



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Análise de Problemas de Rolamentos do Gerador em Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

**Autor**

**João Miguel da Silva Rodrigues**

**Orientadores**

**António Manuel Gameiro Lopes**

**José Emanuel da Fonseca Saraiva**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes</b> <b>Professor da Universidade de Coimbra</b>

**Colaboração Institucional**

---

**SENVION**  
wind energy solutions

**Senvion Portugal**

**Coimbra, julho, 2016**

À minha Mãe. Sem ela nada seria possível.

## Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado/estágio contou com o apoio das pessoas que me estão mais próximas, sem elas teria sido muito mais difícil todo este percurso. Fico muito grato a todos.

Aos meus pais, pelo apoio extraordinário que me deram ao longo de todo o percurso deste trabalho, puxando sempre por mim e motivando-me para que desse sempre o máximo.

À minha irmã, sem a qual teria sido tudo diferente, pela enorme ajuda a escrever esta dissertação, estando sempre próxima e pronta a ajudar.

Aos meus amigos César e Luís pelo divertimento, companheirismo e apoio que sempre me deram.

A toda a estrutura DEM/UC pela disponibilidade e gosto em ensinar e que me preparou para os anos vindouros.

A toda a estrutura da *Senvion* Portugal sediada em Oliveira de Frades, particularmente com quem lidei, em especial ao Tiago, pois sem a sua ajuda este estágio não seria possível.

Agradeço, por último e de forma especial, à Mariana, pelo amor, carinho e amizade que me deu ao longo deste percurso. Sem ela teria sido tudo mais vazio.

## Resumo

Com o mercado de fabricação, venda e manutenção de equipamentos de aproveitamento de energia renovável, nomeadamente a eólica, cada vez mais exigente, dificilmente se pode aceitar que um aerogerador esteja parado por falhas técnicas quando as condições ambientais são propícias a gerar energia.

Sendo o gerador um dos componentes principais da turbina eólica, a sua falha através dos rolamentos é algo que necessita de ser identificada e tratada com a maior exatidão possível, pois a viabilidade das empresas de operação e manutenção, depende de fatores de resolução como este.

A rápida atuação perante estes problemas é a forma mais eficiente de reduzir os custos, tentando perceber precocemente qual o problema e a melhor forma de o combater, maximizando o tempo de produção e diminuindo o tempo de paragem.

Dentro dos possíveis problemas, há um que exige especial atenção por não existirem soluções viáveis ou baratas para a sua resolução. Esse problema baseia-se nas correntes elétricas criadas no rotor do gerador e que atravessam o rolamento, acelerando exponencialmente a sua degradação. Ora, a causa principal deste fenómeno foi tratada neste estágio, com o intuito de descobrir o que está na origem do seu aparecimento.

Foi efetuada a substituição de um rolamento devido ao seu estado e criado um plano de lubrificação para que a vida dos rolamentos se estenda, com o intuito de só ser substituído quando as condições climatéricas sejam favoráveis, ou seja, quando for expectável que não haja vento.

O plano principal deste trabalho passou, assim, por criar um sistema que permita aos técnicos de manutenção saber avaliar e resolver o problema – quando deparado com ele –, para que o aerogerador esteja o menor tempo possível parado.

**Palavras-chave:** Turbina eólica, Gerador indutivo, Rolamento do gerado, Corrente do rotor, Lubrificação.

## Abstract

With the business of making, selling and maintenance of renewable energy equipments, like wind power, even more demanding, hardly someone can take that a wind turbine remain stopped for technical failures when the environment conditions are propitious to produce energy.

Knowing that the generator is one of the major components on the wind turbine, its failure because of the bearings is something that needs to be identified and treated with the best accuracy, as the viability of these companies depends on resolution factors like these.

The fast actuation towards these problems is the most efficient way to reduce the costs, trying to know as soon as possible, what the problem is and the best way to solve it, maximizing the production time and decreasing the downtime.

Within all the possible problems, there is one that requires special attention by not existing enough viable or cheap solutions for its resolution. This problem is based on electric currents created in the generator's rotor and that go throw the bearing, exponentially accelerating its degradation. Now, the main cause of this phenomenon was treated in this paper, with the intention of finding out what is the cause of his appearance.

It was carried out a bearing replacement due to its state and created a lubrication plan to extend the bearings life, with the purpose of just be replaced when the meteorological conditions are perfect, that is to say, when are expectable that there is no wind.

The main plan of this paper is create a system that allow technicians of operation and maintenance to know evaluate and solve the problem – when facing it – in order to decrease the wind turbine downtime.

**Keywords** Wind turbine, Induction generator, Bearing generator, Rotor current, Lubrication.

## Índice

Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas .....	ix
Simbologia e Siglas .....	x
Simbologia.....	x
Siglas .....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Estado da Arte.....	2
2. TURBINAS EÓLICAS .....	3
2.1. Componentes gerais.....	3
2.2. Descrição do funcionamento de um aerogerador.....	5
2.2.1. Curva de potência .....	10
2.2.2. Escolher um aerogerador .....	12
3. ESTÁGIO .....	13
3.1. <i>Senvion</i> GmbH.....	13
3.2. <i>Senvion</i> Portugal .....	13
3.3. Início e contextualização do estágio na empresa .....	14
3.3.1. VentiPower .....	14
3.3.2. Formação .....	15
3.4. Explicação do problema.....	15
3.5. Desenvolvimento do estágio .....	16
4. COMPONENTES BASE DO PROBLEMA.....	17
4.1. Gerador .....	17
4.1.1. Isolamento do gerador .....	18
4.2. Rolamento SKF 6332 M/C3 .....	18
4.3. Sensores e equipamentos de medição .....	19
4.3.1. Multímetro digital 179 da <i>Fluke</i> ®.....	19
4.3.2. Equipamento de testes multifunções 1650B da <i>Fluke</i> ®.....	20
4.3.3. Câmara termográfica de infravermelhos Ti400 da <i>Fluke</i> ®.....	20
4.3.4. Sonómetro <i>PeakTech</i> ® 8005.....	20
4.3.5. Aplicações <i>Android Multi Measures 2</i> e <i>Vibration Meter</i> .....	21
4.4. Plataformas de monitorização.....	21
4.4.1. JIRA.....	21
4.4.2. SCADA.....	21
5. DESENVOLVIMENTO DO PROBLEMA .....	23
5.1. Lubrificação do rolamento.....	23
5.2. Lubrificação no parque eólico de Castanheiras .....	24
5.2.1. Conclusões do ensaio .....	28
5.3. Troca de Rolamento.....	29
5.4. Fio Terra .....	32

---

5.5. Análise de dados .....	34
5.5.1. Conclusões.....	39
5.6. Medições no parque de Teixeira, aerogerador 6.....	39
5.6.1. Teste de continuidade .....	40
5.6.2. Ensaio .....	41
5.6.3. Conclusões do ensaio .....	45
5.7. Resistividade das escovas .....	47
5.8. Processo Tomada de Decisão .....	48
6. CONCLUSÕES.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
ANEXO A .....	54
Princípios físicos da conversão de energia eólica .....	54
ANEXO B .....	60
Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal .....	60
ANEXO C .....	62
Abordagem geral do mercado de energia eólica em Portugal .....	62
ANEXO D .....	65
Oferta existente no mercado de aerogeradores em Portugal .....	65
APÊNDICE A .....	69
Parques eólicos detidos pela <i>Senvion</i> Portugal.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribuição dos modos de falha dos geradores de aerogeradores com mais de 2MW de potência .....	2
Figura 2.1. Componentes gerais de uma turbina eólica ( <i>Winfair website (2016)</i> ) .....	3
Figura 2.2. Escada de acesso à <i>nacelle</i> com sistema anti queda .....	4
Figura 2.3. Incrementos aerodinâmicos das pás do rotor .....	4
Figura 2.4. Interior da <i>nacelle</i> e <i>hub</i> ( <i>Senvion GmbH website (2016)</i> , “MM”) .....	5
Figura 2.5. Rolamento de esferas de quatro pontos de contacto de duas filas ( <i>Luoyang SBI website</i> ).....	5
Figura 2.6. Vista dos componentes do <i>hub</i> .....	6
Figura 2.7. Veio Rápido e componentes associados .....	7
Figura 2.8. Mastro meteorológico .....	8
Figura 2.9. Elementos situados no azimute .....	9
Figura 2.10. <i>Display</i> do sistema de comando <i>Mita-Teknik</i> .....	9
Figura 2.11. Curva de potência do aerogerador <i>Senvion MM92</i> ( <i>Senvion GmbH website (2016)</i> , “MM92”).....	12
Figura 3.1. Potência instalada em Portugal de cada fabricante em 2015 e 2016 (ENEIGI e E2P (2016)) .....	14
Figura 4.1. Gerador de 2MW da VEM.....	17
Figura 4.2. Escovas terra dos geradores VEM .....	18
Figura 4.3. Rolamento SKF 6332 M/C3 .....	19
Figura 5.1. Mistura da massa com o óleo da <i>Spanjaard</i> .....	24
Figura 5.2. Componentes de lubrificação do rolamento e local de medida.....	25
Figura 5.3. Massa antiga do rolamento.....	25
Figura 5.4. Massa antiga do rolamento com óleo “E” da <i>Spanjaard</i> .....	26
Figura 5.5. Mistura <i>Spanjaard</i> a sair pelo vedante.....	27
Figura 5.6. Local da medição após o processo de lubrificação .....	27
Figura 5.7. Valor da temperatura antes e depois do ensaio com referência às rotações do veio rápido.....	27
Figura 5.8. Vibrações no eixo dos X.....	28
Figura 5.9. Vibrações no eixo dos Y .....	28
Figura 5.10. Remoção do veio lento e da tampa pequena .....	30

Figura 5.11. Remoção dos componentes fixatórios.....	31
Figura 5.12. Remoção da tampa grande, rolamento e batente.....	31
Figura 5.13. Rolamento SKF 6332/HC5C3S0VA970 .....	31
Figura 5.14. Batente com massa nova .....	32
Figura 5.15. Localização do fio terra e do sensor indutivo .....	33
Figura 5.16. Posição das ponteiras durante a medição .....	40
Figura 5.17. Vibrações no eixo dos X .....	41
Figura 5.18. Vibrações no eixo dos Z.....	42
Figura 5.19. Marcação da temperatura do corpo do gerador e acoplamento em °C .....	42
Figura 5.20. Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C .....	43
Figura 5.21. Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C .....	43
Figura 5.22. Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 3 do ensaio .....	43
Figura 5.23. Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 3 do ensaio .....	44
Figura 5.24. Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 4 do ensaio .....	44
Figura 5.25. Conjunto das vibrações nos dias do ensaio. Eixo dos Z em cima e X em baixo .....	46
Figura 5.26. Medição da resistência elétrica das escovas com um multímetro.....	47
Figura 5.27. Componentes das tampas dianteiras do gerador .....	48
Figura 5.28. Processo tomada de decisão .....	49
Figura NA.1 – Condições do fluxo de ar em espaço aberto influenciado pela extração de energia mecânica .....	55
Figura NA.2 – Coeficiente de potência vs a velocidade do escoamento antes e após a passagem pelo aerogerador .....	57
Figura NA.3 – Condições do escoamento ao atravessar um disco ideal de um aerogerador .....	58
Figura NB.1 – Rotor do tipo <i>Savonius</i> , à esquerda e do tipo <i>Darrieus</i> , à direita.....	60
Figura NB.2 – Aerogerador de eixo horizontal do parque eólico Teixeiraó.....	61
Figura NC.1. Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal Continental em 2015 .....	62
Figura NC.2 - Potência instalada por distritos e regiões autónomas em 2015 .....	63
Figura NC.3 - Países com mais potência eólica instalada na Europa em 2015.....	63
Figura NC.4 - Países com mais potência eólica instalada no mundo em 2015.....	64

---

Figura NC.5 - Potência instalada dos promotores em 2015 .....	64
Figura ND.1 - Quota de mercado dos fabricantes em 2015 .....	65
Figura ND.2 - Diferença entre a curva de potência de um aerogerador E70 e E103 da fabricante Enercon ( <i>Enercon website</i> ) .....	66

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1. Temperatura máxima do rolamento afetado .....	29
Tabela 5.2. Resistência terra medida nos aerogeradores com valores menores que $500k\Omega$	34
Tabela 5.3. Resistência terra medida em Alto dos Forninhos AG 4 .....	35
Tabela 5.4. Resistência terra medida em Marvila AG 1 .....	35
Tabela 5.5. Resistência terra medida em Marvila AG 2 .....	35
Tabela 5.6. Resistência terra medida em Sobrado AG 2 .....	35
Tabela 5.7. Resistência terra medida em Vale Grande AG 2 .....	35
Tabela 5.8. Resistência terra medida em Vale Grande AG 6 .....	36
Tabela 5.9. Temperatura máxima do rolamento afetado .....	40
Tabela 5.10. Temperatura máxima ambiente e do rolamento nos dias prévios e durante o ensaio .....	45
Tabela 5.11. Valores do ruído no decorrer do ensaio .....	45
Tabela 5.12. Valores da resistência elétrica de uma escova nova e usada .....	47
Tabela AP.1. Parques ao cargo da manutenção da <i>Senvion</i> Portugal .....	69

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$  – Área

$C_p$  – Coeficiente de Potência

$E$  – Energia Cinética

$F$  – Força

$\dot{m}$  – Caudal Mássico

$m$  – Massa

$m/s$  – Metro por Segundo

$rpm$  – Rotações por Minuto

$P$  – Potência

$s$  – Segundo

$\dot{V}$  – Caudal Volúmico

$v$  – Velocidade do Escoamento

$\rho$  – Densidade

### Siglas

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

GWEC – Global Wind Energy Council

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia

Industrial

UC – Universidade de Coimbra

## 1. INTRODUÇÃO

A grande dimensão que o ramo da energia eólica está a ter no espaço das energias renováveis, está a gerar uma enorme concorrência, advindo daí a exigência no que toca aos preços praticados. Um dos fatores que está diretamente relacionado com a redução de preços é a manutenção das turbinas eólicas. Para que isso aconteça, é necessária uma otimização da resolução dos problemas encontrados durante o seu funcionamento. Neste grande mercado, está em vantagem quem for mais rápido e perspicaz a perceber quais as fontes de dificuldades que aparecem todos os dias.

É neste contexto que está inserida a *Senvion Portugal*, uma empresa que gere todo o tipo de etapas associadas ao fabrico, venda e manutenção de aerogeradores em Portugal e na qual o presente trabalho se irá desenvolver.

No âmbito da cadeira “Dissertação de Mestrado”, o estágio com duração de seis meses naquela empresa tem como objetivo principal dar resposta a alguma carência existente ao nível da manutenção/prevenção que se efetua diariamente por equipas de técnicos especializados em operação e manutenção de aerogeradores, bem como o de adquirir conhecimento e experiência para a tomada de decisões e resolução do problema identificado, neste caso, rolamentos danificados no gerador.

Nas manutenções realizadas pelos técnicos da empresa, deu-se conta que os rolamentos que se encontram no gerador estariam a ficar danificados, estando a emitir ruído e vibrações anormais. Era imperativo identificar as causas, já que se o gerador para, então significa que todo o sistema está sem produzir, havendo grandes prejuízos para a empresa.

Foi concluído que as correntes induzidas no rotor do gerador atravessavam o rolamento, acelerando a sua fadiga, criando arco elétrico entre os corpos rolantes e as pistas aquando da sua passagem, removendo pequenas quantidades de metal. A partir daqui iniciava-se um processo rapidamente destrutivo que só terminava com a sua substituição.

Era assim necessário encontrar respostas para a causa da passagem da corrente pelo rolamento, tendo como objetivo principal criar uma metodologia de resolução que possa ser usada pelos técnicos, assim como criar um plano de lubrificação para se possa responder da melhor forma ao problema. Para isso interessa ir à turbina eólica e perceber o histórico

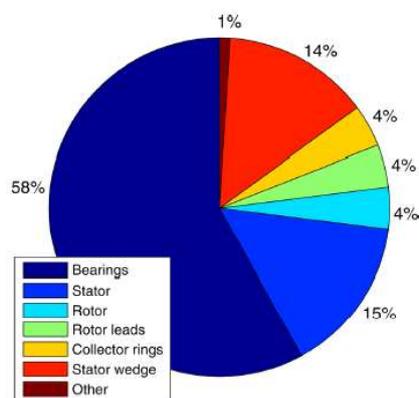
desta problemática, fazendo o estudo das falhas, e encontrar um padrão, por forma a que se possa anular/minimizar o seu efeito negativo.

## 1.1. Estado da Arte

Hoje em dia, os aerogeradores implantados em parques eólicos estão obrigados a ter uma grande fiabilidade durante o seu funcionamento Y. Amirat, V. Chouqueuse e M. Benbouzid (2013) afirmam que a sustentabilidade e viabilidade dos parques eólicos estão altamente dependentes da redução de custos de operação e manutenção.

Em 2015, J. Chen *et al.* apud Y. Amirat *et al.* (2009) comprovaram que são gastos em operação e manutenção, a nível de aerogeradores *offshore*, entre 100.000 e 300.000 euros, e quase 45.000 euros, em aerogeradores *onshore*, para os manter funcionais. Acrescentam ainda que o gerador é um dos mais importantes componentes do *drivetrain* do aerogerador e que é fácil que este se danifique, devido às grandes flutuações de carga e funcionando sob condições ambientais severas.

Como demonstram M. Whittle *et al.* (2013 apud K. Alewine e W. Chen 2010), o principal mecanismo de falha do gerador são os seus rolamentos (abaixo representado pela Figura 1.1).



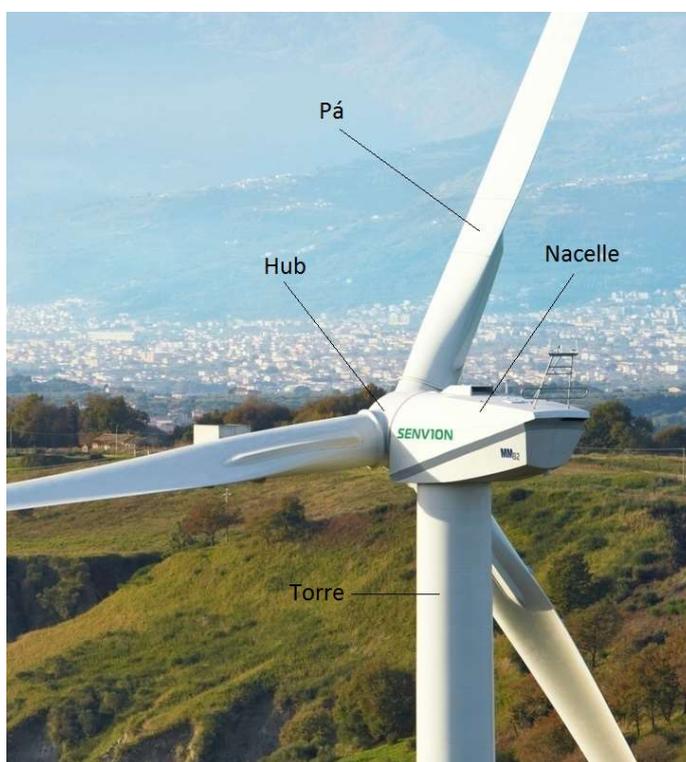
**Figura 1.1.** Distribuição dos modos de falha dos geradores de aerogeradores com mais de 2MW de potência

M. Whittle, J. Trevelyan, e P. Tavner (2013) comprovam que os rolamentos do gerador dos aerogeradores têm uma surpreendente elevada taxa de falha, com essas falhas a acontecerem demasiado cedo, devido ao clássico contacto por fadiga dos elementos rolantes. Uma importante causa para estas falhas são as correntes elétricas que os atravessam.

## 2. TURBINAS EÓLICAS

Vão ser explicados, ainda que de forma superficial, no presente capítulo, conceitos gerais das turbinas eólicas, passando desde a sua constituição ao seu funcionamento e de todos os mecanismos necessários à conversão de energia eólica em elétrica.

### 2.1. Componentes gerais



**Figura 2.1.** Componentes gerais de uma turbina eólica (*Winfair website (2016)*)

De um modo geral, uma turbina eólica ou aerogerador é constituída pela torre, *nacelle*, *hub* e as pás, como indica a figura 2.1.

A torre foi concebida como torre tubular cónica em aço que tem três a cinco segmentos, dependendo da altura. O acesso ao interior é feito por uma porta na sua base. Uma vez no seu interior, a subida até à *nacelle* é feita através de escadas com sistema de proteção contra quedas como mostra a figura 2.2. Nos segmentos da torre existem

plataformas que contêm alçapões que são abertos à medida que se sobe e fechados de seguida por questões de segurança.



**Figura 2.2.** Escada de acesso à *nacelle* com sistema anti queda

A *nacelle* é feita de plástico reforçado com fibra de vidro como material de revestimento. Tem dois alçapões: um para fazer subir e descer material necessário à manutenção, através de um sistema de elevação, e outro para o seu acesso. Tem ainda uma saída para o exterior no teto, onde se pode aceder ao mastro meteorológico. É no seu interior que se encontra o *drivetrain*, palavra usada para descrever todos os componentes mecânicos essenciais que fazem parte do aerogerador, como o veio lento, caixa multiplicadora ou o veio rápido.

O *hub* é constituído pelo *spinner* (parte exterior feita de fibra de vidro) e pelo cubo (parte interior fabricada em ferro fundido onde vão ser aparafusadas as pás). O seu acesso é realizado a partir da *nacelle*.

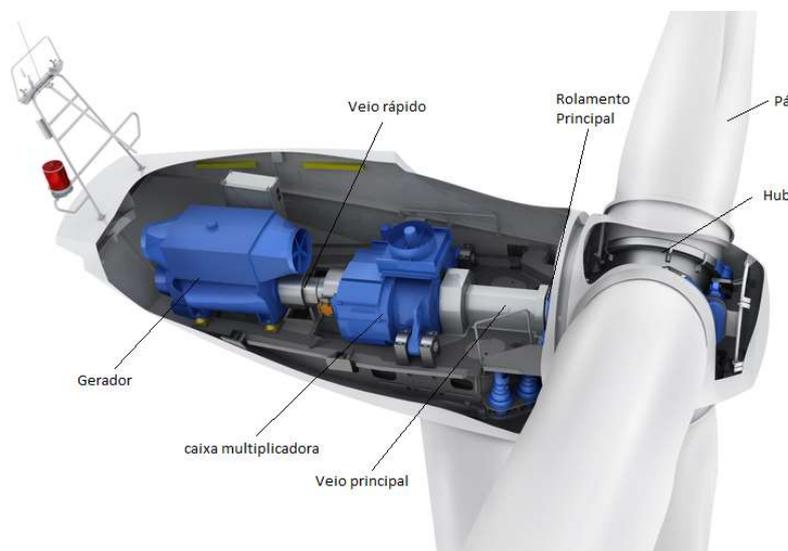
As pás apresentam a forma de um perfil alar e são fabricadas com fibra de vidro. Ao longo do tempo houve mudanças no sentido de serem otimizadas para a captação de vento como, por exemplo, a criação de incrementos aerodinâmicos demonstrados na figura 2.3.



**Figura 2.3.** Incrementos aerodinâmicos das pás do rotor

## 2.2. Descrição do funcionamento de um aerogerador

Neste subcapítulo abordar-se-á o modelo MM da *Senvion*, representado na figura 2.4, e a sua tecnologia.



**Figura 2.4.** Interior da nacelle e hub (*Senvion GmbH website (2016), "MM"*)

O funcionamento do aerogerador começa no rotor, cujo objetivo é captar a energia contida no vento. O fluxo de ar cria uma força aerodinâmica que coloca o rotor num movimento rotativo. Cada pá está unida ao cubo através de um rolamento de esferas – que é lubrificado automaticamente – de quatro pontos de contacto de duas filas, podendo este ser ajustado de forma individual através dos motores de *pitch* (em português, sistema de passo). Um rolamento deste tipo está representado em corte na figura 2.5.



**Figura 2.5.** Rolamento de esferas de quatro pontos de contacto de duas filas (*Luoyang SBI website*)

O sistema de *pitch* é constituído por três motores de corrente contínua, três caixas desmultiplicadoras e três rolamentos, cada um correspondente a cada pá. A sua função é deslocar o ângulo da pá para a posição necessária através do pinhão da caixa desmultiplicadora que, ao desmultiplicar a velocidade de rotação do motor, irá atuar sobre a

cremalheira do rolamento, que se encontra na parte exterior. A parte interior está aparafusada ao cubo e a exterior à borda da pá. O anel exterior está representado na figura 2.6.



**Figura 2.6.** Vista dos componentes do *hub*

Neste contexto, a amplitude de  $90^\circ$  é aquela em que a direção do vento está na direção do bordo de ataque da pá, chamada posição em “bandeira”. Esta encontra-se nesta posição quando o aerogerador não está a trabalhar. Caso contrário, a pá encontra-se a  $0^\circ$ , estando de face para o vento. Esta rotação é normalmente efetuada automaticamente.

Além disso, o travão primário do aerogerador, denominado travão aerodinâmico, é efetuado por este sistema, permitindo que as pás rodem de  $0^\circ$  para  $90^\circ$  (o rotor não para totalmente, mas fica a rodar suavemente). Se a velocidade do vento for excessiva e o momento nominal ultrapassado, o sistema aumenta o ângulo das pás para se tornar estável.

Caso haja uma falha de rede (quando os motores não têm energia, deixando de haver controlo na rotação das pás), são acionadas automaticamente as baterias existentes dentro do cubo, correspondendo a cada pá um *pack* de três baterias. Cada uma delas tem 7 blocos de 12V, perfazendo um total de 252V.

No interior do cubo existem três conversores que fornecem instruções aos diversos mecanismos de funcionamento das pás, consoante os dados medidos pelos sensores (sensores de amplitude, temperatura dos motores,...), bem como os três *packs* de baterias e ainda uma *central box* (que existe ou não dependendo do sistema de comando do aerogerador) cuja função é, entre outras, enviar os dados para a *top box*.

Acoplado ao cubo através de uma flange está o veio lento ou *low shaft*, que transmite a potência criada pela rotação das pás para a caixa multiplicadora.

A suportar o peso do rotor e envolto de uma chumaceira está um rolamento de rolos autocompensador de duas carreiras – rolamento principal – que absorve as cargas axiais

assim como uma parte das cargas radiais que atuam sobre o rotor. Este rolamento é, uma vez mais, lubrificado automaticamente.

Na caixa multiplicadora, a velocidade do veio lento é multiplicada cerca de 100 vezes (dependendo do tipo de caixa), transformando-se na saída em veio rápido ou *fast shaft*.

Logo à saída da caixa, solidário com o veio rápido, encontra-se o travão de paragem do rotor, que inclui um disco e um travão hidráulico, que formam o sistema de travagem destinado à interrupção do movimento de rotação do rotor. Só é acionado através da corrente de segurança ou manualmente (no caso de manutenção no *hub*, por exemplo).

O veio rápido é constituído, em parte, por plástico reforçado com fibra de vidro, constituindo a parte mais frágil do rotor; se houver algum tipo de dessincronização de rotações, o rotor partirá por esta parte, salvaguardando outros componentes essenciais. Existe ainda, no seguimento deste, um acoplamento que une o veio de alta velocidade ao veio do gerador. Estes componentes estão representados na figura 2.7.



**Figura 2.7.** Veio Rápido e componentes associados

No gerador é convertida a energia mecânica, recebida do vento e recolhida através do rotor, em energia elétrica. No seu interior encontram-se dois rolamentos rígidos de esferas de uma carreira, o rotor, o estator e vários sensores de medição, como a temperatura e vibração.

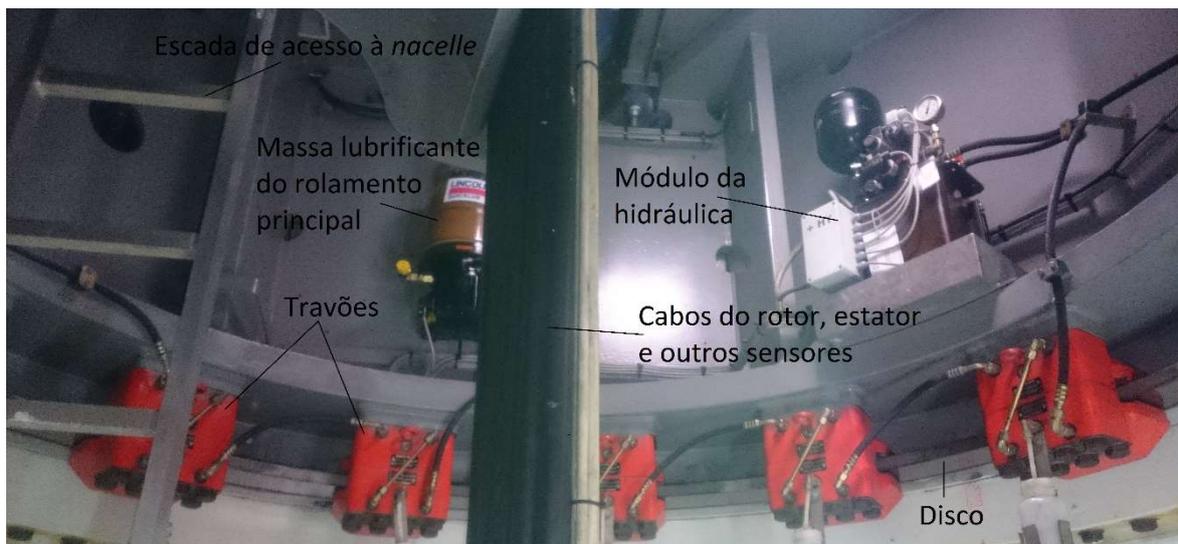
A velocidade do vento e a sua direção são avaliados por um anemómetro e um cata-vento, respetivamente, situados na parte exterior da *nacelle*, no mastro meteorológico, como mostra a figura 2.8.



**Figura 2.8.** Mastro meteorológico

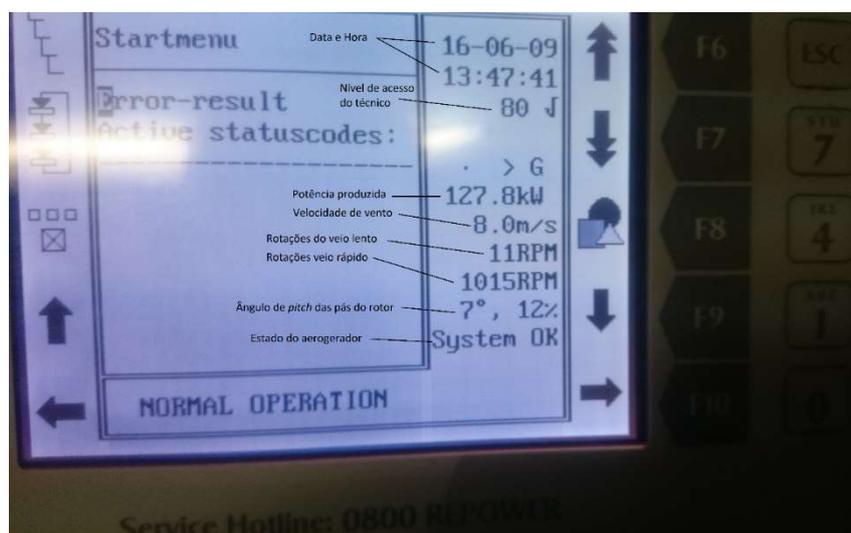
Para que haja eficiência no processo de obtenção de energia, o rotor tem de estar constantemente alinhado com a direção do vento, sendo necessário o acionamento do sistema de azimute (sistema de *yaw* em inglês). É feito automaticamente pelo sistema de comando (que recebe a leitura do cata-vento) e é constituído por um rolamento do mesmo tipo do sistema de *pitch*, quatro motores e respetivas redutoras e um sistema de travagem. O rolamento tem o mesmo diâmetro externo que o topo da torre e conecta a torre (anel exterior) à *nacelle* (anel interior). Quando é necessário ajustar a posição, os quatro motores são acionados ao mesmo tempo, fazendo rodar o pinhão da redutora que, por sua vez, transmite o movimento à cremalheira do anel exterior do rolamento.

Há a salientar que está incluído, neste sistema, um mecanismo de travagem hidráulico constituído por um conjunto de travões aplicados num disco para garantir a estabilidade do conjunto *hub/nacelle* que está a rodar. Estes travões aplicam uma pressão de sensivelmente de 160 bar quando o sistema de azimute não está a funcionar. Se estiver, a pressão dos travões é ainda de 18 bar para não causar instabilidades constantes, dado que as maxilas dos travões nunca estão completamente soltas do disco. Tem ainda a vantagem de manter o disco sempre limpo e polido. Este sistema e outros elementos da turbina eólica, representados na figura 2.9, situam-se por baixo do veio lento, local de entrada na *nacelle*.



**Figura 2.9.** Elementos situados no azimute

Os dados medidos por todos os sensores, incluindo os do *hub*, são monitorizados, tratados e controlados pelo sistema de comando. É composto por um painel tátil (figura 2.10), onde se podem observar constantemente todos os valores medidos pelos sensores, (potência produzida, velocidades do veio lento e rápido, temperaturas, vibrações, pressões óleo, dados meteorológicos, ...), as falhas técnicas que poderão existir e alterar manualmente os mecanismos existentes (o sistema de *pitch*, por exemplo). Nos aerogeradores da *Senvion* existem dois tipos de *software* que implementam o sistema de comando: o sistema da *Mita-Teknik*, utilizado nos aerogeradores mais antigos e o sistema *Bachmann*, utilizado nos mais recentes. Visto, durante o estágio, ter havido contacto sobretudo com aerogeradores com sistema *Mita-Teknik*, é esse que vai ser abordado neste relatório.



**Figura 2.10.** Display do sistema de comando *Mita-Teknik*

Este sistema encontra-se embutido na *top box*, local onde também estão os disjuntores principais, controlando-se aí todos os componentes elétricos da máquina.

Estes dados operacionais podem ser igualmente observados e alterados remotamente, para que todos os dados relativos ao estado do aerogerador estejam sempre disponíveis em qualquer lado sem se estar presente no local onde está instalado.

Para transmitir os dados vindos do *hub*, que em condições normais de funcionamento está a rodar, para a *top box*, que está fixa, é necessário um mecanismo que transmita eficazmente a informação de um meio rotacional para um meio fixo. Esse problema é resolvido através de um componente chamado junta rotativa ou *slip-ring*, que se encontra depois da caixa multiplicadora, ao lado do *fast shaft*.

De salientar que toda a energia elétrica necessária aos motores e componentes elétricos do aerogerador são fornecidos da rede, exterior a si.

Os cabos do rotor e estator que transportam a energia elétrica produzida pelo gerador descem pela torre até à sua base (passam de cabos para barramentos e voltam a cabos antes de chegarem à base da torre) onde passam pelo conversor cuja função é excitar o rotor do gerador e monitorizar as características elétricas da rede e da máquina. Passam ainda pela cela de proteção e corte do transformador que corta a tensão da rede para a máquina e vice-versa quando for necessário. Daí passam para o transformador que transforma a tensão de 690V para 30.000V e por fim, sob o solo, vão para a subestação onde a energia elétrica é colocada na rede, transformada de 30.000V para 60.000V (aqui, como exemplo, são colocados os valores do parque eólico de Castanheiras, situado no Mogadouro, mas os valores de saída dos transformadores podem variar, mas o da saída do gerador é sempre 690V).

Existem, assim, dois fluxos de energia elétrica a passar pelo aerogerador. A que vem da rede, comprada ao fornecedor, e a que vai para a rede, criada pelo aerogerador, vendida ao cliente.

### **2.2.1. Curva de potência**

A curva de potência de um aerogerador é o gráfico base que traduz a potência produzida em função da velocidade do vento que sobre ele incide à altura do *hub*.

Hau (2006) explica que o seu cálculo é baseado no conjunto das características da potência do rotor, como a eficiência da conversão da energia mecânica em elétrica. A curva de potência é considerada o certificado de desempenho do aerogerador, pois os seus dados têm de ser garantidos pelo fabricante ao comprador de como o aerogerador cumpre aquelas características.

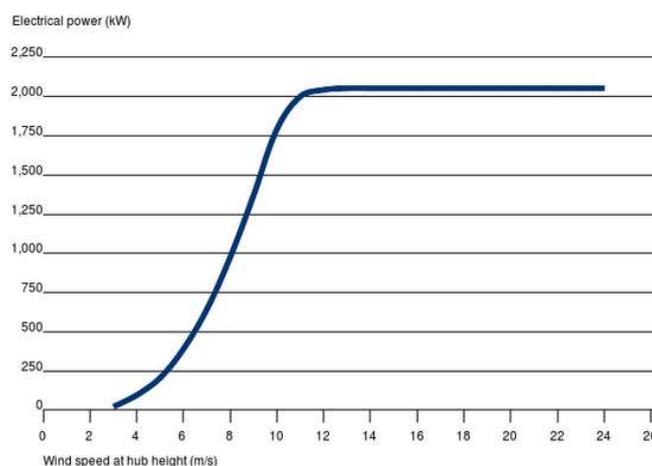
Para se obter a forma da curva de potência é imperativo que contenha três características do aerogerador relativas à velocidade do vento, tais como: a que velocidade do vento o aerogerador inicia o seu arranque, a que velocidade do vento o gerador atinge o seu máximo de produção e a que velocidade máxima do vento o aerogerador pode produzir.

As condições atmosféricas são baseadas numa “atmosfera comum” de acordo com a norma DIN 5450 (densidade do ar  $1.225\text{kg/m}^3$ , temperatura a  $15^\circ\text{C}$ ). A temperatura e a altitude influenciam diretamente a densidade do ar que, por sua vez, influencia diretamente a potência produzida.

No continente europeu existem três países com entidades especializadas em realizar a curva de potências nos aerogeradores: Alemanha, Dinamarca e Holanda. Estes institutos estão ligados através de uma organização, MEASNET, iniciada pela Comissão da União Europeia e trabalham em conjunto para melhorarem e unificarem os métodos de medição.

De forma geral, todos os aerogeradores começam a produzir com ventos na ordem dos  $3\text{m/s}$ . Se no local a instalar a turbina eólica a velocidade média do vento for até aos  $7\text{m/s}$ , é considerado um local com ventos fracos. Se for de  $8$  a  $12\text{m/s}$ , é considerado local com ventos médios e se for superior a  $12\text{m/s}$ , é um local com ventos fortes.

Assim, convém que, se no local a instalar o aerogerador os ventos forem predominantemente fracos, tende-se a escolher um aerogerador otimizado para essas características, ou seja, um aerogerador com um rotor o maior possível para que consiga captar mais vento, e por sua vez, a energia nele contida. Por outro lado, se a velocidade média do vento for elevada não será necessário o aerogerador ter um grande diâmetro do rotor, sendo possível escolher um aerogerador com um diâmetro do rotor mais baixo, conseguindo-se a mesma produção com um aerogerador mais barato. A título de exemplo, a figura 2.11. mostra uma curva de potência associada ao aerogerador MM92 da *Senvion*.



**Figura 2.11.** Curva de potência do aerogerador *Senvion MM92* (*Senvion GmbH website (2016), "MM92"*)

### 2.2.2. Escolher um aerogerador

Vender energia elétrica à rede, aproveitando a energia contida no vento através de um aerogerador, obedece a certos critérios que têm de ser respeitados. Vão ser referenciados aqui os vários aspetos básicos necessários.

Quando o local pretendido para instalar o parque eólico estiver escolhido, é necessário contactar as entidades competentes com o intuito de instalarem torres meteorológicas, para, com os dados fornecidos por ela, se escolher o aerogerador mais adequado. Este processo de recolha de dados (como, velocidade do vento em diversos pontos de altura, da direção do vento, da humidade, pluviosidade, temperatura e pressão atmosférica) demora, no mínimo, um ano, sendo aconselhados dois anos.

Com os dados recolhidos, escolhe-se o fabricante desejado e o aerogerador que otimize as características medidas.

Estando todos os assuntos confirmados com as entidades competentes e as licenças necessárias tratadas, iniciam-se os trabalhos de construção civil para os acessos e fundação, instalando-se, no local pretendido, o aerogerador.

São, posteriormente, ligados os cabos desde o aerogerador até à subestação e é realizado o comissionamento, que tem como finalidade testar o funcionamento de todos os componentes e funções do aerogerador. Por último, liga-se à rede elétrica pública ficando, assim, finalizado para funcionamento.

### 3. ESTÁGIO

Descrevem-se, neste capítulo, os conteúdos associados ao local onde decorreu o estágio, bem como o problema a resolver.

#### 3.1. *Senvion GmbH*

O grupo *Senvion GmbH* representa um grupo de empresas direcionadas para o ramo de energia renovável, nomeadamente a eólica, com o objetivo de produzir e distribuir aerogeradores por todo o mundo. Tem a sua sede em Hamburgo, na Alemanha, e é detida atualmente por um fundo de investimento norte-americano, a *Centerbridge Partners*. É atualmente um dos líderes mundiais na produção e manutenção em aerogeradores, detendo uma fatia considerável neste mercado. De acordo com o seu *website*, na Alemanha existem cerca de 4.5 GW de potência instalada e quase 14GW em todo o mundo, estando representada em 24 países, com projetos em novos países a serem realizados.

#### 3.2. *Senvion Portugal*

A *Senvion Portugal* é responsável pela venda, operação e manutenção de aerogeradores representantes da marca *Senvion* em Portugal. Está dividida em duas localizações: a sede, em Oliveira de Frades, no distrito de Viseu, que é gerida diretamente pelo Eng.º José Saraiva que lidera as várias equipas de operação e manutenção dispersas pelo país. Está dividida em norte e sul do país, estando cada equipa distribuída consoante a sua localização. A outra parte da empresa está situada na cidade do Porto, onde a sua dinâmica está virada para o suporte técnico de venda. Foi a empresa com maior crescimento no sector em Portugal, no ano de 2015, afirmando-se com grande poder de crescimento, sendo que no final do presente ano irá contar com quase 500 MW instalados por todo o país como está explícito na figura 3.1. Em Portugal a empresa *Senvion Portugal* é a empresa mãe das empresas *Ria Blades*, sediada em Aveiro, que produz pás para os aerogeradores da marca e da *VentiPower*, com sede em Oliveira de Frades e que produz *naceis* e *hubs*.

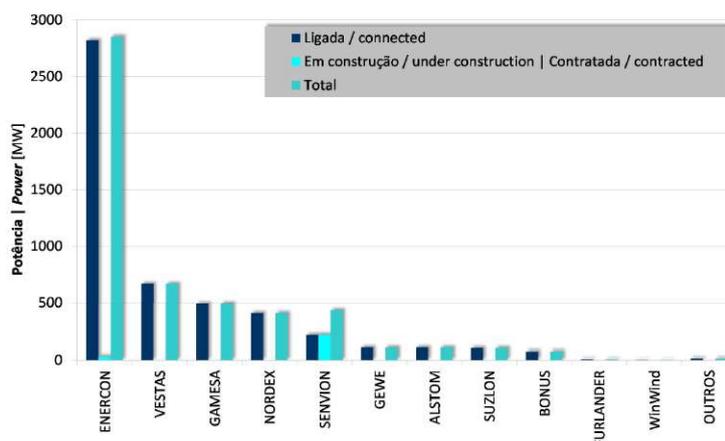


Figura 3.1. Potência instalada em Portugal de cada fabricante em 2015 e 2016 (ENEPI e E2P (2016))

### 3.3. Início e contextualização do estágio na empresa

Este estágio, com duração de seis meses, decorreu na empresa *Senvion Portugal* e desde cedo que começou a ser desenvolvido e estruturado pelo orientador de estágio da empresa, o Eng.º José Saraiva.

De forma a compreender melhor a estrutura da empresa, os primeiros dias foram de visita a um parque eólico pertencente à *Senvion Portugal*, com um primeiro contacto do que é, qual a sua estrutura e características. As duas semanas seguintes decorreram na fábrica da empresa *VentiPower*.

#### 3.3.1. VentiPower

Tal como anteriormente, também aqui houve um primeiro contacto com o funcionamento de um aerogerador, com uma permanência durante uma de duas semanas na fábrica da empresa *VentiPower*, cujo objetivo se foca na montagem e fabrico de aerogeradores. Localiza-se-se no mesmo edifício que a *Senvion Portugal*, em Oliveira de Frades.

Dessa forma, houve oportunidade de ter um contacto direto com todos os componentes principais de um aerogerador e entender todo o processo de montagem de todo tipo de componentes que fazem parte de um aerogerador, integrando as diversas equipas de produção, ao auxiliar os técnicos de montagem.

### 3.3.2. Formação

Para obter autorização para acompanhar os técnicos de operação e manutenção nos aerogeradores instalados em parque, bem como subir até à *nacelle* e *hub*, a formação em alturas e primeiros socorros, lecionada pela Escola Portuguesa de Salvamento, no seguimento da segunda semana na *VentiPower*, foi de extrema importância, com a aprendizagem de conceitos e técnicas indispensáveis ligados à segurança e salvamento em alturas como:

- Utilização EPI (Equipamento de Proteção Individual) e normas associadas;
- Conceito de Fator de Queda;
- Técnicas de intervenção de incêndios em espaços confinados;
- Como trabalhar em segurança em aerogeradores;
- Primeiros socorros baseado no Sistema Integrado de Emergência Médica;
- Manobrar corretamente um desfibrilador;
- Suporte básico de vida, para se saber agir e diagnosticar corretamente casos de queimaduras, hemorragias e fraturas;
- Salvamento em aerogeradores.

### 3.4. Explicação do problema

Inicialmente o tema encontrado para a resolução de uma problemática neste estágio era diferente. Consistia em otimizar as torres meteorológicas instaladas em parque, para tornar a sua estrutura mais resistente.

Porém, uma vez que os rolamentos do gerador de alguns aerogeradores ficavam danificados com alguma frequência, tentar localizar a fonte do problema e solucioná-lo seria um tema muito mais desafiante, apesar de ter em consideração que a vertente do curso era Energia e Ambiente e este tema era inteiramente da vertente de Produção e Projeto.

A proposta foi a de encontrar solução para os rolamentos do gerador das turbinas eólicas que já se encontrassem danificados, aumentando a sua vida útil, de modo a que, a ser necessária a sua substituição, este procedimento fosse realizado em período favorável à sua troca, ou seja, quando fosse expectável não haver vento no parque. Para além disso, o desafio incluiu a criação de um plano de lubrificação e de um processo de tomada de decisão, para que futuramente os técnicos o soubessem solucionar, quando deparados com esse problema.

A premissa consistiu que os rolamentos do gerador eram atravessados por corrente elétrica (corrente que deveria ser encaminhada para a Terra), criando arco elétrico na passagem entre as esferas e a pista, soltando-se pequenos sulcos de metal da pista e fazendo com que esta se tornasse cada vez mais irregular.

Desta forma, as esferas, ao atravessarem este local, causavam vibração, iniciando um processo destrutivo sem solução, que culminaria com a substituição do rolamento. Ora, substituí-lo não resolveria o problema, uma vez que, se a passagem da corrente continuasse, este novo rolamento também se destruiria. A única forma era substituir por um rolamento com esferas de cerâmica, pois este material não é bom condutor elétrico.

Assim, desde o início do acompanhamento das equipas de operação e manutenção no terreno, a curiosidade para entender o que motivava este problema cresceu.

### **3.5. Desenvolvimento do estágio**

Com o tema do estágio e respetivos objetivos estabelecidos, foi elaborado, a pedido do orientador da empresa, um mapa em Excel da interpretação da referência dos rolamentos *SKF*. Foi dada ênfase especial aos rolamentos rígidos de esferas de uma carreira, pois são rolamentos deste tipo que o gerador tem e é sobre eles que este trabalho se desenvolverá.

Após a fase inicial de aprendizagem nas instalações da *Senvion*, nos meses seguintes houve a integração nas equipas de operação e manutenção nos vários parques eólicos que a *Senvion* Portugal detém em todo o país. Aí, com a realização de manutenção, todos os conceitos e mecanismos que fazem com que o aerogerador funcione, foram percecionados. Este período foi fulcral para o entendimento da problemática em estudo.

As últimas 10 semanas de estágio decorreram esporadicamente nos parques, apenas para ver os rolamentos afetados, aplicar as medidas preventivas necessárias e medir os valores que seriam imperativos para uma melhor leitura e resolução do problema.

## 4. COMPONENTES BASE DO PROBLEMA

Vão ser descritos, neste capítulo, todos os componentes que afetam de forma direta a resolução e tratamento do problema do estágio.

### 4.1. Gerador

O gerador das turbinas eólicas *Senvion* MM é, regra geral, da empresa alemã VEM. É um gerador trifásico de indução ou assíncrono com um *slip-ring* no rotor.

Tem uma potência de saída à de 2040kW, tensão de 690V, uma intensidade de 1556A e funciona a uma frequência de 50Hz. A sua velocidade de rotação máxima é de 1800rpm, no sentido dos ponteiros de relógio, começando a produzir quando as rotações atingirem as 1150rpm.

É composto pelo rotor, estator, dois rolamentos rígidos de esferas de uma carreira, um *slip-ring* e conta com um sistema de refrigeração ar-ar. A sua aparência está representada na figura 4.1.



Figura 4.1. Gerador de 2MW da VEM

O *slip-ring* tem como função fazer com que, à semelhança do *slip-ring* da *nacelle*, conectar o rotor, em movimento de rotação, à rede elétrica exterior. O seu funcionamento baseia-se em escovas de carvão que, através de uma mola, estão em permanente contacto com as pistas, fazendo estas parte integrante do rotor. Tem quatro pistas, cada uma correspondente a cada uma das três fases e ainda uma pista Terra, todas na parte de trás do gerador.

A lubrificação do rolamento é feita manualmente através de uma bomba, onde se coloca o seu tubo no grasser que, por meio de um canal chega ao interior do rolamento. A massa antiga sai por gravidade, para um depósito exclusivo para o efeito. É monitorizada a sua temperatura através de dois sensores colocados na sua proximidade.

#### 4.1.1. Isolamento do gerador

Uma vez que durante o funcionamento de gerador existirão correntes no rotor, é necessário haver um isolamento eficiente para que esta não chegue ao corpo do gerador. Ora, no gerador, o rotor encontra-se sustentado apenas pelos dois rolamentos que contactam diretamente com o veio através do anel interno, estando o anel externo em contacto com as tampas de suporte e, por sua vez, estas tampas estão isoladas eletricamente do corpo do gerador. O único caminho existente para o escoamento das correntes induzidas na terra do rotor é feito exclusivamente pelas escovas terra do *slip-ring*, representadas na figura 4.2.

Se todos estes componentes estiverem a cumprir a sua função, não pode haver corrente elétrica a atravessar o rolamento.



Figura 4.2. Escovas terra dos geradores VEM

## 4.2. Rolamento SKF 6332 M/C3

Os rolamentos que se encontram no interior do gerador são do fabricante SKF de modelo 6332 M/C3, como mostra a figura 4.3. São rolamentos rígidos de esferas de uma carreira.



**Figura 4.3.** Rolamento SKF 6332 M/C3

A partir da designação do rolamento, consegue-se verificar quais as suas características. O primeiro número, “6” indica que o rolamento é rígido de esferas de uma carreira. O segundo é a série de diâmetro, “3”. Os dois últimos números, “32”, multiplicados por 5, representam o diâmetro do seu furo, ou seja, 160mm. Os dois sufixos dão informação extra por este ser um rolamento com características especiais: a letra “M” significa que a gaiola é feita em latão maquinado, centrada nos corpos rolantes; “C3” revela que o rolamento tem a folga interna maior que a normal (a folga interna normal do rolamento é aquela que foi selecionada para que uma folga operacional adequada seja obtida quando os rolamentos forem montados com os ajustes normalmente recomendados e as condições de funcionamento forem normais).

### **4.3. Sensores e equipamentos de medida**

Descrevem-se, seguidamente, os vários equipamentos de medida utilizados no decorrer deste trabalho.

#### **4.3.1. Multímetro digital 179 da *Fluke*®**

O multímetro digital de modelo 179 da *Fluke*® é um equipamento usado, como o nome indica, para medir várias unidades: tensão contínua e alternada, corrente, resistência. No âmbito deste trabalho foi unicamente usada a opção de resistência, cujas características do aparelho utilizado para esta medição são as seguintes:

- Precisão: +/- 1.5% + 3 dígitos;
- Resolução máxima: 0.1Ω;

- Máxima medição: 50M $\Omega$ .

#### 4.3.2. Equipamento de testes multifunções 1650B da *Fluke*®

O equipamento de testes multifunções de modelo 1650B da *Fluke*® foi utilizado neste trabalho para fazer o teste de continuidade, uma forma mais precisa de medir a resistência elétrica de um material. Seguem-se as características para esta função:

- Precisão: +/- 1.5% + 3 dígitos;
- Medição (seleção automática): 20 $\Omega$ , 200 $\Omega$ , 2000 $\Omega$ ;
- Resolução: 1 $\Omega$ ; 0.1 $\Omega$ ; 0.01 $\Omega$ ;
- Tensão circuito aberto: > 4V.

#### 4.3.3. Câmara termográfica de infravermelhos Ti400 da *Fluke*®

A câmara termográfica de infravermelhos Ti400 da *Fluke*® mede a temperatura dos materiais através de radiação infravermelha e com a característica de focagem muito rápida através de laser. No âmbito deste trabalho utilizou-se para medir a temperatura do corpo do gerador e do veio rápido. As suas características principais:

- Gama de medição de temperatura: -20°C a +1200°C;
- Precisão da medição da temperatura: +/- 2 °C ou 2% (a 25 °C nominais, o que for superior);
- Correção de emissividade no ecrã.

#### 4.3.4. Sonómetro *PeakTech*® 8005

O sonómetro profissional da *Peaktech* 8005 tem como finalidade medir o ruído emitido pelo rolamento e, por conseguinte, o gerador. Tem como principais características:

- Precisão: +/- 1.4dB;
- Resolução: 0.1dB;
- Intervalo de frequência: 31.5Hz a 8kHz.

Este sonómetro tem ainda a opção de medir em dois tipos de medição: o dBA que mede da mesma forma que o ouvido humano, variando a amplitude, e o dBC, que é usado para medir ruído de máquinas industriais, mantendo a amplitude constante. Foi utilizado este último.

#### 4.3.5. Aplicações *Android Multi Measures 2* e *Vibration Meter*

*Multi Measures 2* é uma aplicação para o sistema operativo *Android* que é composta por várias ferramentas de medição como a bússola, cronómetro, nível, etc. Neste trabalho utilizou-se unicamente a característica de acelerómetro, com o intuito de medir as vibrações.

Já a aplicação *Vibration Meter*, do mesmo sistema operativo, serviu apenas para medir as vibrações.

Ambas as aplicações servem-se do acelerómetro do telemóvel para fazer as medições, medindo-as nos três eixos: X, Y e Z.

### 4.4. Plataformas de monitorização

As duas plataformas informáticas, a descrever seguidamente, foram ferramentas importantes utilizadas no decorrer da resolução da problemática em causa.

#### 4.4.1. JIRA

O *software* JIRA foi criado pela *Atlassian* e tem como objetivo ser uma ferramenta de desenvolvimento para ajudar empresas a organizarem o trabalho interno, podendo criar todo o tipo de ferramentas. Na *Senvion*, entre outras utilizações, é aplicado como uma base de dados dos erros e falhas que os técnicos encontram no aerogerador e não podem ser resolvidos no momento, chamados RNC (relatório não conformidade). Também é na plataforma que são guardados e arquivados os manuais de manutenção, ficando assim em formato informático todas as informações relativas ao aerogerador.

#### 4.4.2. SCADA

A plataforma informática *SCADA Solutions* fornece, através do *software* implementado nas turbinas eólicas, a consulta remota de todas as medições feitas pelos sensores dos aerogeradores. Os dados são transmitidos por fibra ótica do aerogerador até à subestação onde daí são ligados por cabo telefónico ou por fibra até ao distribuidor da rede. Assim é possível manobrar remotamente todos os aspetos do aerogerador, sendo possível pará-lo e realizar inúmeras funções sem ter que se deslocar ao local.

Nesta plataforma conseguem-se monitorizar os parques com os dois sistemas de comando, *Bachmann* e *Mita-Teknik*. Realça-se o inconveniente que nos aerogeradores com o sistema *Mita-Tekink*, há muitos sensores que não são transmitidos para a plataforma. Neste sentido, é impossível verificar os dados do aerogerador ao longo do tempo. A única forma de o fazer é usar o seu próprio *software*, com a limitação de só se poder ler os dados até 36 horas após a sua medição.

## 5. DESENVOLVIMENTO DO PROBLEMA

Apresenta-se de seguida, por ordem cronológica, o trabalho desenvolvido na *Senvion* para a resolução do problema em estudo ao longo do estágio.

### 5.1. Lubrificação do rolamento

A primeira abordagem para resolver o problema foi através da massa lubrificante do rolamento. Verificou-se que, a partir do momento em que era detetado, o rolamento danificava-se muito rapidamente. Partiu-se do princípio que, ao abordar uma entidade especializada em fabricar lubrificantes de alto rendimento, o problema seria mitigado. A empresa em questão foi a *Spanjaard*.

Houve contacto direto com um técnico dessa empresa com o objetivo de discutir o problema para se encontrar a melhor forma de o resolver. A massa usada normalmente nos rolamentos, e a indicada pelo fabricante do gerador, é a Mobil SHC100.

Após discussão no sentido de revelar as características a que os rolamentos estavam sujeitos e o processo de lubrificação que tem sido feito, foi proposta a seguinte mistura de produtos: a massa *Spanjaard* RB2-X com o óleo *Spanjaard* “E” *engine oil supplement*.

Tanto o óleo *Spanjaard* “E” como a massa *Spanjaard* RB2-X contêm bissulfureto de molibdénio. Este é um componente químico que melhora a eficácia da lubrificação já que é um agente natural que suporta altas temperaturas e tem, entre outras características, uma baixa expansão térmica. A sua utilização consegue aumentar consideravelmente o ponto de lubrificação evitando assim fricção nas peças metálicas sujeitas a maior temperatura e choque (já que este produto só iria ser aplicado nos rolamentos afetados), evitando o desgaste rápido do rolamento. De salientar que este composto é utilizado essencialmente para velocidades baixas. Uma vez que a rotação dos rolamentos em causa é média/alta, ir-se-ia ainda assim experimentar pois o objetivo era prolongar a vida do rolamento por poucos meses.

A mistura tem como finalidade lubrificar o rolamento com uma massa com menor viscosidade para que atue rapidamente, misturando-se com a massa já existente no rolamento.

As quantidades de mistura aconselhada foram: a cada 5kg de massa RB2-X mistura-se com 250ml de óleo “E”.

## 5.2. Lubrificação no parque eólico de Castanheiras

A primeira oportunidade para resolver o problema aconteceu em meados do mês de maio. No parque eólico de Castanheiras, situado no concelho de Mogadouro, distrito da Guarda, uma das duas turbinas eólicas apresentava um rolamento do gerador num estado de avançada deterioração.

Com o objetivo de lubrificar o rolamento com a mistura dos componentes da *Spanjaard*, foi preparado todo o material necessário no armazém da *Senvion*: pesou-se o balde para retirar o seu peso no final da pesagem já com a mistura e procedeu-se à junção da massa RB2-X com o óleo “E” (figura 5.1) nas quantidades acordadas.



Figura 5.1. Mistura da massa com o óleo da *Spanjaard*

Para verificar se existiriam melhorias após o processo, os valores da temperatura, ruído e vibração foram medidos no pré e pós lubrificação do rolamento. Efetuou-se a medição da temperatura através do ecrã do sistema de comando *Mita-Tekink*, a vibração através da aplicação *Multi Measures 2* e o ruído através de vídeos realizados pelo telemóvel *Sony Xperia Z1*. O telemóvel foi colocado de maneira a que a aresta de cima encostasse ao corpo do gerador.

Este ensaio contou com os seguintes materiais: balde com a mistura; bomba de lubrificação; espátula; sacos de plástico, e panos.

Para se iniciar o ensaio, na *nacelle*, o técnico de manutenção limitou a máquina. Isto porque para fazer as medições é necessário que o aerogerador esteja a funcionar normalmente. Ora, dependendo da velocidade do vento, as rotações no gerador iriam sempre variar, fazendo com que as medições fossem efetuadas a velocidades de rotação diferentes. Assim, para evitar esta situação, limitou-se a turbina eólica para que ela mantivesse constante a sua velocidade de rotação. O número acordado foi de 1000 *rpm*. Para o fazer, o técnico tinha de pedir uma autorização especial à central de operação, situada na Alemanha. Com a proteção do veio rápido tirada, iniciou-se o aerogerador e, quando as rotações estabilizaram nas 1000 rotações, foram iniciadas as medições: gravou-se o vídeo para registar o ruído que o gerador produzia, captaram-se fotografias às temperaturas registadas no sistema de comando e, com a aplicação, mediram-se as vibrações encostando o telemóvel à tampa do gerador no local demonstrado na figura 5.2.



**Figura 5.2.** Componentes de lubrificação do rolamento e local de medida

De seguida, com a máquina parada e travada, retirou-se o reservatório da massa antiga do rolamento (figura 5.3) e limpou-se com a ajuda da espátula pois, com a entrada da mistura, a massa em excesso iria sair.



**Figura 5.3.** Massa antiga do rolamento

Com a finalidade de remover mais facilmente a massa antiga existente dentro do rolamento, lubrificou-se com uma lata de 250 ml de óleo *Spanjaard* “E” através de uma bomba de lubrificação. Este processo foi realizado com o veio rápido a girar com velocidade de rotação lenta, durante 5 minutos. De seguida, retirou-se outro recipiente (figura 5.4) com a massa expulsa, colocando-a num saco de plástico grande.



Figura 5.4. Massa antiga do rolamento com óleo “E” da *Spanjaard*

Para garantir que o rolamento ficasse só com a mistura, era preciso por uma grande quantidade da mesma dentro do rolamento. Assim, como aconselhado pelo técnico da *Spanjaard*, injetou-se 1kg da mistura, enchendo a bomba de lubrificação com o auxílio da espátula.

Enquanto se enchia o rolamento com a mistura, iam-se retirando recipientes com massa antiga, já misturada com a nova, perfazendo um total de 4 recipientes.

Dado o tamanho do rolamento, 1kg era uma quantidade enorme de lubrificação. Mesmo com a quantidade que foi expulsa, era expectável que o rolamento ficasse excessivamente cheio, já que é aconselhável que este contenha cerca de 1/3 de espaço livre para que as esferas não encontrem demasiada resistência.

Aliado ao rolamento estar com lubrificante a mais, o óleo “E” posto antes fez com que a mistura do interior do rolamento ficasse demasiado líquida, conseguindo vencer a força do vedante, uma vez que este está dimensionado para massas com consistências maiores. Quando se iniciou o aerogerador para fazer as medições seguintes, verificou-se a saída de um pouco da mistura do rolamento pelo vedante como demonstra a figura 5.5.

Tendo isto em consideração, optou-se por não colocar o óleo “E” antes da mistura e colocar apenas uma bombada de mistura, faseada ao longo do tempo, nos ensaios posteriores.



Figura 5.5. Mistura *Spanjaard* a sair pelo vedante

Quando se observou a saída mistura pelo vedante, era expectável que esta, com o veio a trabalhar, espilrasse. Para isto não acontecer, foi colocada a proteção do veio rápido. Isto trouxe um inconveniente: a proteção tapava até à tampa do rolamento, onde foram realizadas as medições antes deste processo.

Ao ser medida na parte adjacente a esta, era expectável que, em termos de vibrações, estas fossem ser maiores. O local da nova medição é mostrado na figura 5.6.



Figura 5.6. Local da medição após o processo de lubrificação

Assim sendo, as medições da temperatura, antes e depois são (figura 5.7):

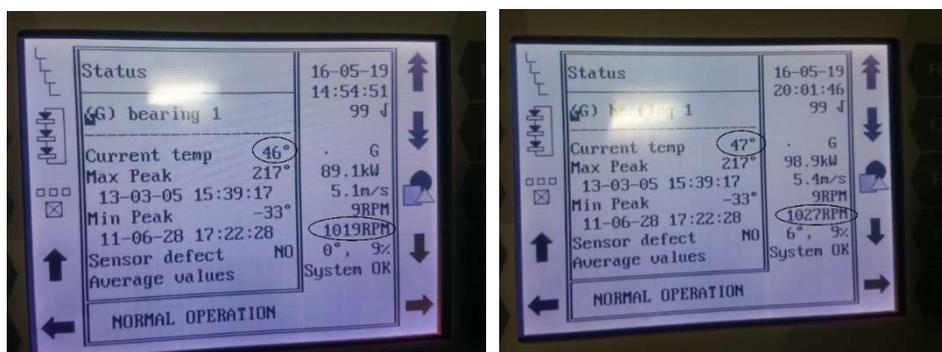


Figura 5.7. Valor da temperatura antes e depois do ensaio com referência às rotações do veio rápido

As vibrações antes e depois, no eixo dos X, figura 5.8.

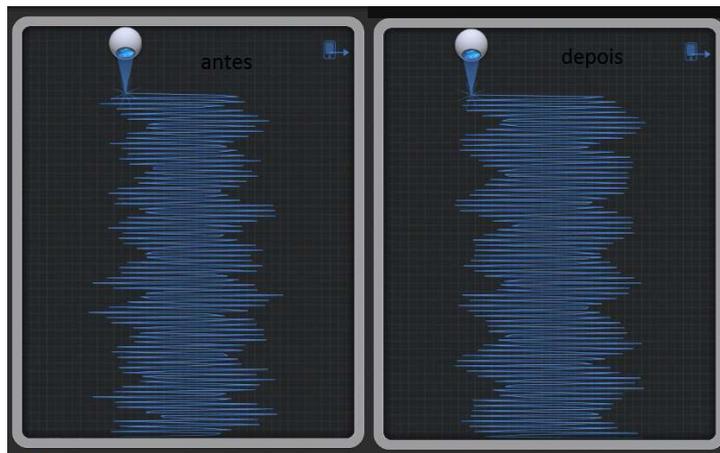


Figura 5.8. Vibrações no eixo dos X

As vibrações antes e depois, no eixo dos Y, figura 5.9.

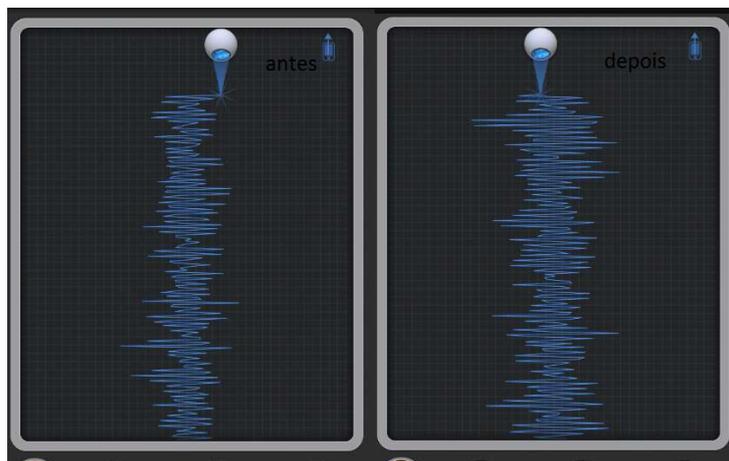


Figura 5.9. Vibrações no eixo dos Y

### 5.2.1. Conclusões do ensaio

Conclui-se deste processo que, pelo facto da mistura dentro do rolamento ser demasiado líquida e por conseguinte se ter que colocar a proteção do veio rápido, não se conseguiu medir a vibração com exatidão. Se não fosse este facto, seria previsível que a vibração diminuísse com a quantidade de lubrificante que se injetou no rolamento. As vibrações no eixo dos Z não foram apresentadas por serem excessivas para a aplicação distinguir.

Relativamente à temperatura, verifica-se que praticamente não alterou. Apesar do aerogerador estar em funcionamento durante mais de vinte minutos antes de se proceder à segunda medição, como esteve cinco horas parado durante a colocação da mistura, isto afetou a medição. Além disso, não se consegue perceber qual a tendência da temperatura

sem se ter por base vários dias antes e após a medição, com o aerogerador a trabalhar. Ainda assim não é uma leitura linear, pois o valor da temperatura ambiente afeta diretamente a temperatura a que o rolamento está sujeito. Tendo isto em conta, tiraram-se, para os dias anteriores, o valor máximo a que a temperatura do rolamento afetado chegou, estando expostos na tabela 5.1. O dia 19/5 foi o dia da medição.

**Tabela 5.1.** Temperatura máxima do rolamento afetado

Data	15/5	16/5	17/5	18/5	19/5
T. máxima (°C)	51	65	57	72	68

Partindo do facto que a temperatura de um rolamento não defeituoso, com o aerogerador a funcionar, geralmente não ultrapassa os 55°C, estes valores demonstram que o rolamento não estava em condições normais. Para verificar se o ensaio deu resultados era necessário registar estes valores nos dias posteriores ao ensaio. Não sendo possível ir ao aerogerador, os valores teriam de ser registados remotamente.

Como descrito anteriormente, um dos problemas do sistema de comando *Mita-Teknik* é o facto de os valores medidos pelos sensores não ficarem guardados no seu *software* mais do que 36 horas. Dado que não se tinha acesso na altura, foi impossível no dia posterior registar o valor da temperatura, ficando estes dados por colher.

Em termos de ruído, no vídeo realizado conseguem notar-se diferenças no valor emitido pelo gerador, principalmente quando este se encontra a uma velocidade elevada.

Não sendo esta a melhor maneira de realizar este processo, permitiu ainda assim tirar conclusões de como o otimizar, fazendo com que, a partir deste, os seguintes já sejam realizados da melhor maneira, resultando daí resultados mais fiáveis.

Havendo sensores capazes de medir com mais fiabilidade as vibrações do que aplicações de telemóvel, no seguimento deste ensaio foram solicitados à empresa sensores de vibração (acelerómetro) e de potência sonora (sonómetro), de modo a otimizar o processo.

### 5.3. Troca de Rolamento

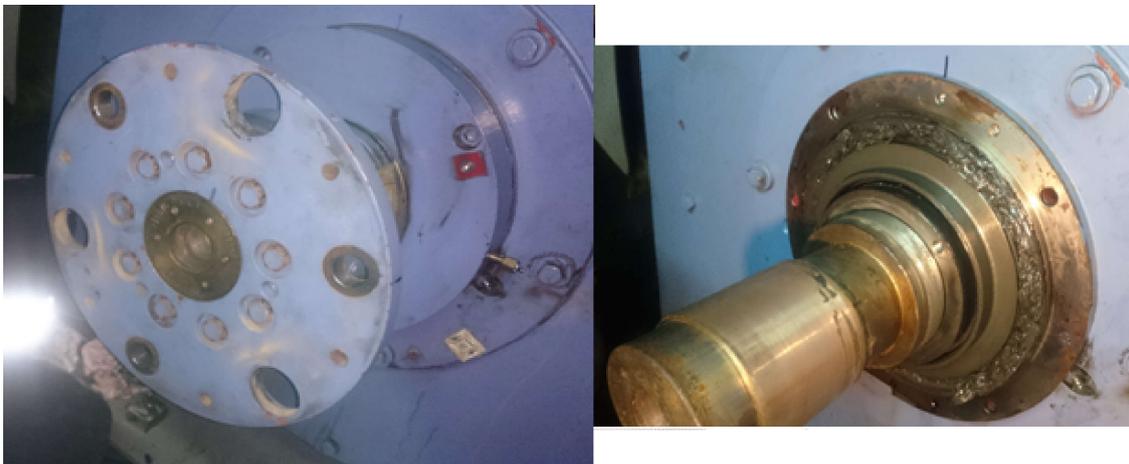
Nos dias seguintes ao ensaio anterior, o aerogerador parou automaticamente com o erro de falta de contacto nas escovas do *slip-ring* do gerador. Admitiu-se que isto se deveu à vibração dos rolamentos danificados, pois possivelmente o rolamento de trás, mais perto do *slip-ring*, estaria também deteriorado.

Posto isto, o aerogerador não tinha condições para continuar a funcionar com os rolamentos danificados desta forma. Conclui-se então que, aquando da colocação da mistura, o rolamento já estaria irreversivelmente afetado. A única solução seria, portanto, substituir o rolamento, tendo sido agendada cinco dias após o processo anterior. Este seria substituído por um semelhante, com a principal diferença a residir nos corpos rolantes, fabricados em cerâmica.

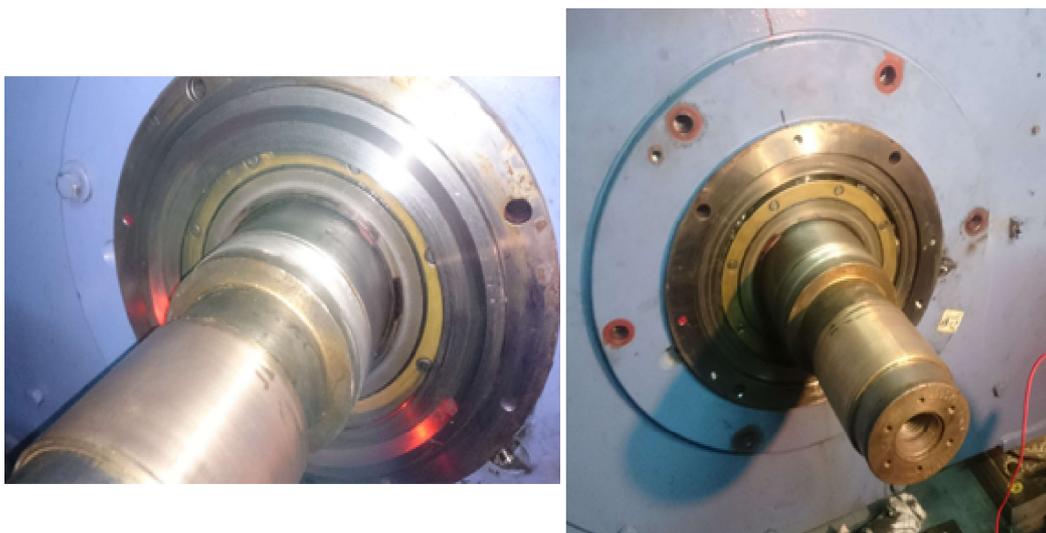
Foi tomada esta decisão, pois os rolamentos que se encontravam no aerogerador já tinham sido substituídos há precisamente 1 ano, sendo urgente descobrir qual a fonte do problema.

A troca de rolamentos é um processo complexo que envolve técnicos especializados e com experiência em realizar este processo. Houve oportunidade de acompanhar toda a sequência de trabalhos, documentando e ajudando quando oportuno.

Para se chegar ao rolamento propriamente dito, é necessário remover em primeiro lugar o acoplamento e o veio rápido. Posteriormente, retira-se a primeira tampa e todas as peças que, em conjunto, permitem que o rolamento permaneça fixo ao veio. Por fim retira-se a última tampa, o rolamento e o batente. Mostram-se, de seguida, fotografias captadas durante o processo, por ordem de execução – figuras 5.10 a 5.12.



**Figura 5.10.** Remoção do veio lento e da tampa pequena



**Figura 5.11.** Remoção dos componentes fixatórios



**Figura 5.12.** Remoção da tampa grande, rolamento e batente

De seguida substitui-se o rolamento pelo modelo 6332/HC5C3S0VA970 da SKF, representado na figura 5.13.



**Figura 5.13.** Rolamento SKF 6332/HC5C3S0VA970

Fez-se o processo inverso: colocou-se o batente com massa nova (figura 5.14), seguindo-se a colocação de todos os outros componentes. Para avaliar se o procedimento se desenrolava corretamente, realizaram-se testes no final. Detetou-se que o veio tinha grandes dificuldades em se movimentar. Após uma exaustiva busca para se entender o motivo descobriu-se que tinha descaído um pouco para trás (para a parte do gerador).



**Figura 5.14.** Batente com massa nova

Uma vez que todos os passos do processo tinham sido cumpridos corretamente, o problema só poderia ser das peças correspondentes ao rolamento traseiro. Procedeu-se então à sua substituição (por um igual ao original), chegando-se à conclusão que um componente teria sido montado ao contrário aquando da anterior substituição, sensivelmente há um ano atrás.

Posto isto, com as substituições efetuadas e o problema solucionado, o gerador ficou a funcionar corretamente e sem problemas.

## 5.4. Fio Terra

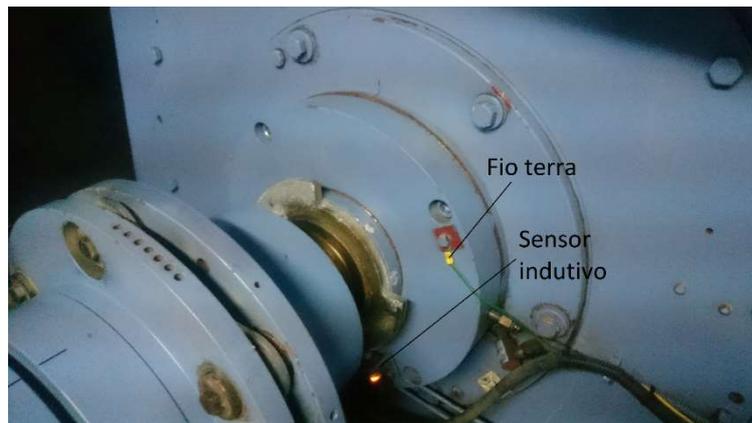
Factualmente, estes rolamentos deterioraram-se em, sensivelmente, um ano. Apesar de se conhecer a causa do fenómeno, teria de existir algo que acelerasse esta degradação, uma vez que a sua vida útil é muito superior.

Como referido na secção anterior, a troca do rolamento foi acompanhada com o intuito de apoiar e aprender como tal se processava, e essencialmente tentar encontrar algo que influenciasse diretamente o desgaste.

Já havia sido observado noutras turbinas eólicas a existência um fio identificado como “terra”, preso à tampa de entrada do veio rápido que não aparentava ser o original do gerador. No dia de troca do rolamento, esse gerador possuía esse fio, pelo que surgiu a

questão de conhecer o motivo de qual seria a sua função, já que um fio terra tem como objetivo drenar a corrente para a terra e estava perto da tampa do gerador.

Já na sede da empresa, após a troca dos rolamentos no parque de Castanheiras, a fotografia que se segue (figura 5.15) foi apresentada e questionada a função do fio terra ao orientador de estágio.



**Figura 5.15.** Localização do fio terra e do sensor indutivo

O sensor indutivo de contagem de rotações do veio rápido está aparafusado diretamente à tampa do gerador. Como explicado em 4.1.1, as tampas estão em contacto com a pista exterior do rolamento fazendo contacto entre elas. A tampa maior está isolada eletricamente, não permitindo que as correntes a atravessem.

Acontecia que, pelo facto de as escovas terra situadas no *slip-ring* não estarem a fazer um contacto eficiente com o veio, o potencial da referência do rotor aumentava até vencer a resistência do contacto da escova-pista. Atendendo ao facto deste processo ser degenerativo e contínuo, a resistência do contacto da escova-pista ia aumentando gradualmente e, por sua vez, o potencial do rotor aumentava de igual forma até vencer a resistência de contacto e assim sucessivamente. Seguindo este raciocínio, quando o potencial terra do rotor atingisse um determinado valor elevado, surgiria, dentro da placa eletrónica do sensor, um arco elétrico que seria transmitido ao sistema de comando como um defeito no sensor, parando automaticamente o aerogerador.

Para fazer com que esta situação não acontecesse, alguns técnicos efetuaram uma ligação terra adicional, colocando o fio na tampa do gerador. Esta ação teve como consequência as correntes não passarem pelo sensor, mas permitia a permanente condução das correntes do rotor à terra pelas pistas do rolamento e respetivos elementos rolantes, danificando irremediavelmente o rolamento.

Assim, como ficará provado, uma vez que a resistência à passagem de corrente do fio terra condutor era menor que o conjunto escova-pista, em vez das correntes serem drenadas à terra por lá, eram em parte pelo fio, acelerando exponencialmente a degradação do rolamento.

## 5.5. Análise de dados

Neste ponto, era imperativo saber quais os parques que apresentavam aerogeradores nas condições descritas anteriormente. Assim sendo, teria de se verificar quais os geradores que apresentam uma resistência terra de  $0\Omega$ . Este valor é medido em todas as manutenções semianuais (anuais a partir de 2015) do aerogerador removendo as escovas terra da pista e medindo a continuidade elétrica entre a pista/veio e a terra. Se o valor medido fosse “0” então o veio encontrava-se em curto-circuito, havendo continuidade. Se isto acontecesse, era possível uma de duas hipóteses: ou o gerador tinha o fio terra colocado ou a tampa do gerador não estava isolada.

O valor mínimo da resistência terra dado pelo fabricante VEM é de  $500k\Omega$ . Assim, através da plataforma JIRA, verificaram-se quais os parques que se encontravam com resistências abaixo deste valor, anotadas pelos técnicos no momento em que realizaram a manutenção. Seguidamente, verificou-se em que data a resistência terra baixou para valores abaixo de  $500k\Omega$  para depois se verificarem os valores medidos pelos sensores nesse intervalo de tempo, já que poderia haver algum fator que fosse assinalável.

Mostra-se na tabela 5.2, os parques com resistência terra abaixo do valor mínimo dado pelo fabricante:

**Tabela 5.2.** Resistência terra medida nos aerogeradores com valores menores que  $500k\Omega$

<b>Parque</b>	<b>Resistência Terra medida (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Data da Medição</b>	<b>Sistema de comando</b>
<u>Alto dos Forninhos 4</u>	240k	Set/15	<i>Bachmann</i>
<u>Castanheiras 2</u>	20k	Fev/16	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Marvila 1</u>	0	Nov/15	<i>Bachmann</i>
<u>Marvila 2</u>	90k	Out/15	<i>Bachmann</i>
<u>Ribamar 1</u>	0	Out/15	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Sobrado 2</u>	450k	Set/15	<i>Bachmann</i>

<u>Tarouca 1</u>	0	Dez/15	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Teixeiró 2</u>	250k	Mar/16	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Teixeiró 4</u>	10k	Abr/16	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Teixeiró 6</u>	0	Mai/16	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Teixeiró 7</u>	0	Mai/16	<i>Mita-Teknik</i>
<u>Vale Grande 2</u>	10k	Mar/16	<i>Bachmann</i>
<u>Vale Grande 6</u>	100k	Out/15	<i>Bachmann</i>

Como supramencionado, nos parques onde se aplicasse o sistema de comando dos aerogeradores *Mita-Teknik*, não era possível verificar os dados medidos durante o tempo de funcionamento do aerogerador. Portanto, nos parques com sistema de comando *Bachmann*, verificaram-se quais tinham sido os valores da resistência terra medidos nas várias manutenções. Os valores estão entre as tabelas: 5.3. e 5.8.

**Tabela 5.3.** Resistência terra medida em Alto dos Forninhos AG 4

<b>Manutenção</b>	1 <sup>a</sup>	0.5	1
<b>Data</b>	4/14	4/15	9/15
<b>Res Terra (<math>\Omega</math>)</b>	>110M		240k

**Tabela 5.4.** Resistência terra medida em Marvila AG 1

<b>Manutenção</b>	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
<b>Data</b>	1/12	05/12	01/13	10/13	02/14	07/14	01/15
<b>Res Terra (<math>\Omega</math>)</b>	1.3M	40M	>275M	0	>275M	0	>275M

**Tabela 5.5.** Resistência terra medida em Marvila AG 2

<b>Manutenção</b>	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
<b>Data</b>	12/11	04/12	11/12	06/13	02/14	07/14	02/15
<b>Res Terra (<math>\Omega</math>)</b>	100k	800k	0	0	6.3M	>275M	9M

**Tabela 5.6.** Resistência terra medida em Sobrado AG 2

<b>Manutenção</b>	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6
<b>Manutenção</b>	01/11	08/11	02/12	08/12	02/13	09/13	04/14	09/14	09/15
<b>Res Terra (<math>\Omega</math>)</b>	>275M	200k	>275M	101k	500k	>275M	272M	0	450k

**Tabela 5.7.** Resistência terra medida em Vale Grande AG 2

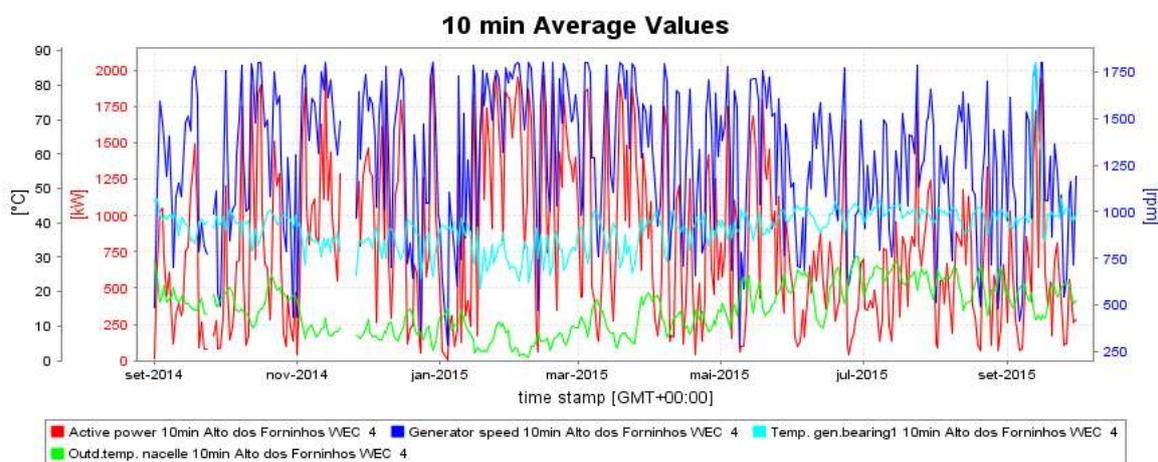
<b>Manutenção</b>	1.5	2	2.5	3	4	4.5
<b>Data</b>	04/13	11/13	5/14	11/14	10/15	03/16
<b>Res Terra (<math>\Omega</math>)</b>	>275M	1.9G	0	>275M	150M	10k

**Tabela 5.8.** Resistência terra medida em Vale Grande AG 6

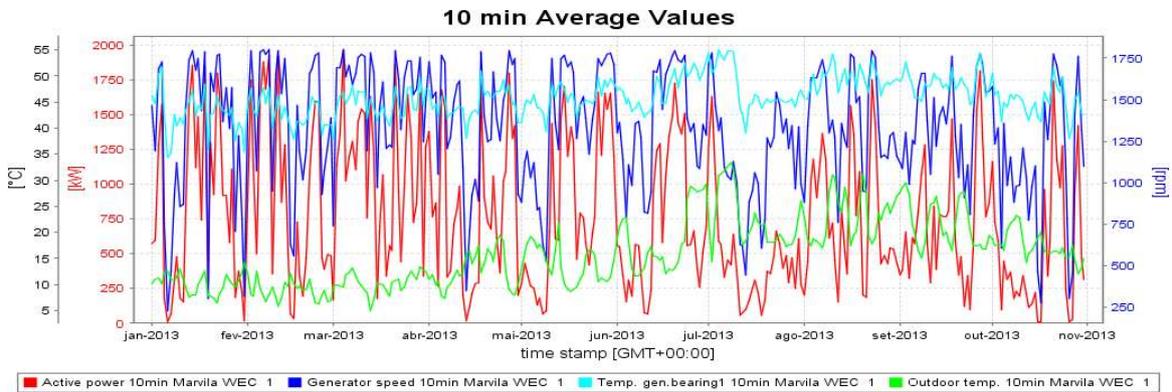
Manutenção	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
Data	03/12	08/12	05/13	02/14	07/14	12/14	10/15
Res Terra ( $\Omega$ )	>275M	0	0	500k	100k	700k	100k

Mostram-se seguidamente os gráficos obtidos através da plataforma SCADA, no intervalo de tempo em que a resistência terra medida passou a menos de  $500k\Omega$  com o intuito de perceber se haveria algo de assinalável que pudesse afetar de alguma forma o rolamento. Partiu-se do princípio que a temperatura seria o fator que se iria destacar, se houvesse corrente a atravessar o rolamento.

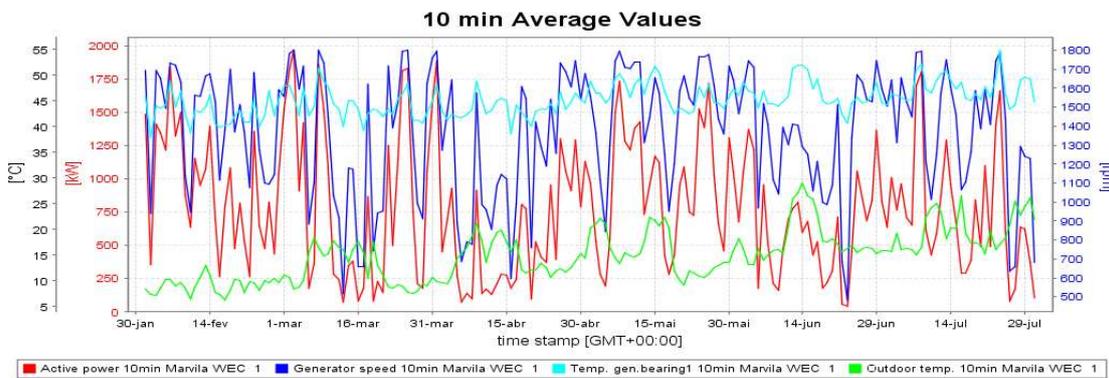
Os dados representados nos gráficos 5.1. a 5.7. são: a temperatura ambiente exterior e temperatura do rolamento da frente do gerador, a velocidade do gerador e a potência produzida pelo aerogerador. Todos estes valores combinados funcionam para evitar leituras erradas, para que a temperatura do rolamento seja lida com base nas características do aerogerador.

**Gráfico 5.1.** Medições de vários sensores em Alto dos Forninhos AG 4

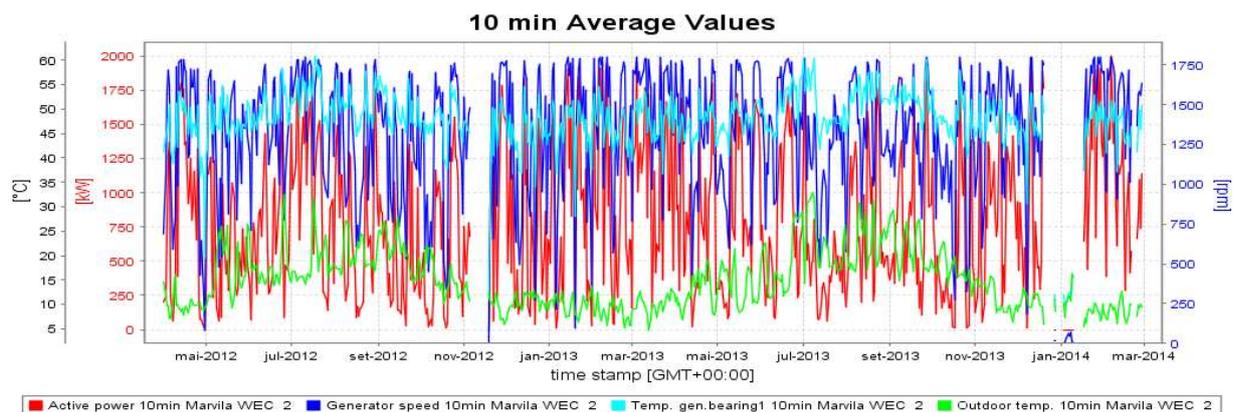
**Gráfico 5.2. Medições de vários sensores em Marvila AG 1 (2013)**



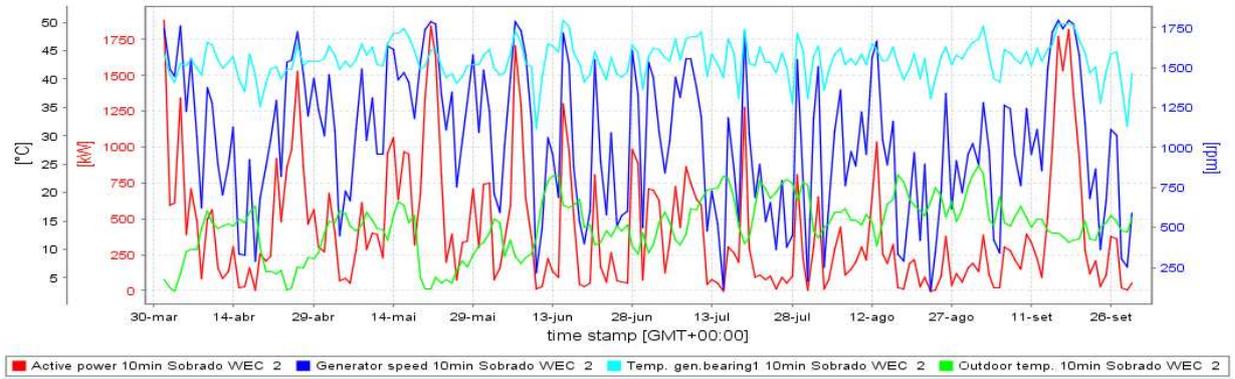
**Gráfico 5.3. Medições de vários sensores em Marvila AG 1 (2014)**



**Gráfico 5.4. Medições de vários sensores em Marvila AG 2**

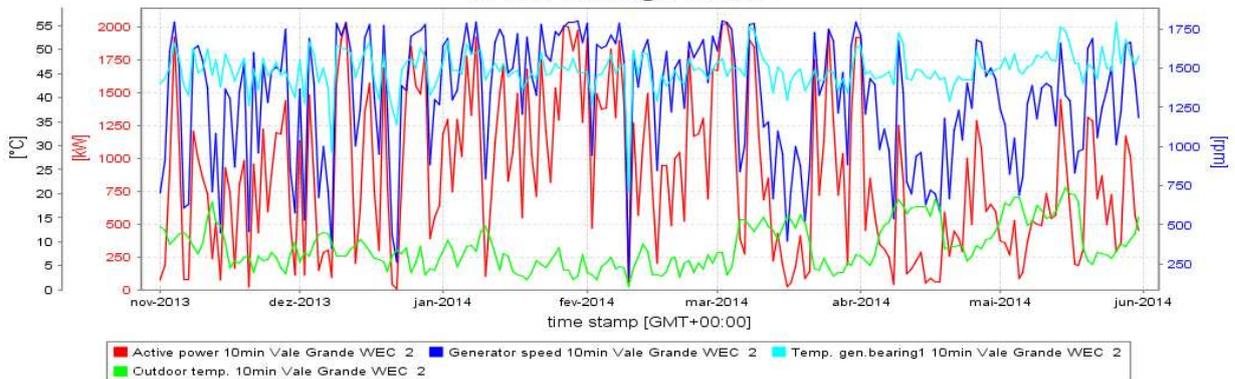


**Gráfico 5.5. Medições de vários sensores em Sobrado AG 2  
10 min Average Values**



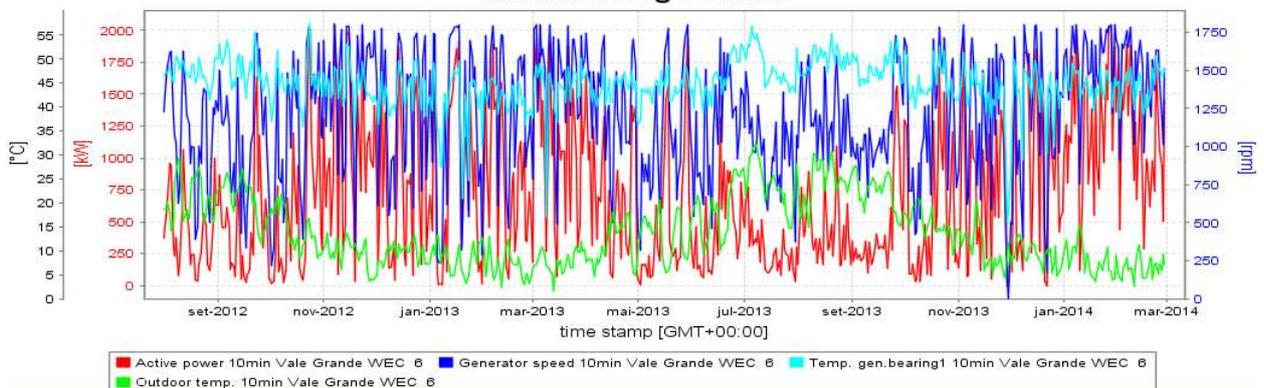
**Gráfico 5.6. Medições de vários sensores em Vale Grande AG 2**

**10 min Average Values**



**Gráfico 5.7. Medições de vários sensores em Vale Grande AG 6**

**10 min Average Values**



### 5.5.1. Conclusões

Verificou-se, pela leitura dos gráficos, que a temperatura do rolamento varia sensivelmente entre 30°C e 55°C, pelo que a temperatura normal de funcionamento do rolamento não foi excedida, já que a temperatura máxima para este tipo de rolamentos situa-se por volta de 120°C. Desta forma, verificou-se que a temperatura do rolamento não aumenta substancialmente quando este se encontra sujeito à passagem de corrente.

Observou-se igualmente que a temperatura ambiente exterior afeta a temperatura do rolamento, nunca excedendo, ainda assim, os 55°C.

Notou-se ainda a diferença do inverno para o verão em que, como a densidade do ar é diferente, a produção do gerador é bastante diferente, já que, com a mesma velocidade de rotação, a produção no inverno é mais elevada.

## 5.6. Medições no parque de Teixeira, aerogerador 6

Identificados os aerogeradores com problemas de isolamento no gerador, iniciou-se o processo de implementação de medidas de resolução deste problema. Assim que oportuno, realizar-se-iam medições, aplicar-se-ia a mistura de lubrificação no rolamento e verificar-se-iam os resultados.

O parque de Teixeira, situado no concelho de Baião, foi o alvo. Este não era a melhor opção, pois o seu sistema de comando é *Mita-Tekink*, mas os testes e medições necessários eram exequíveis. Assim sendo, o aerogerador escolhido foi o 6, visto ter sido reportado pelos técnicos da operação e manutenção o excessivo ruído do seu rolamento. Aliado a isto, como se pode observar na tabela 5.2, este aerogerador tinha resistência terra 0, sendo provável, portanto, que tivesse o fio terra colocado.

Após solicitado à empresa, foi fornecido um sonómetro para medição mais precisa do ruído provocado pelo rolamento, bem como uma câmara termográfica, para medição da temperatura do corpo do gerador. Não sendo possível o fornecimento de acelerómetro, continuou-se a realizar as medições da vibração com o telemóvel. Desta vez, a medição foi realizada com duas aplicações para resultados o mais fiáveis possível.

O plano de uma jornada de quatro dias foi o seguinte: no primeiro dia realizou-se o teste de continuidade (cuja descrição se aborda no próximo ponto), efetuaram-se as medições com os dispositivos descritos anteriormente, colocou-se a mistura da *Spanjaard* no rolamento e, por último, novas medições foram efetuadas, de modo a poder compreender

se, entre o pré e pós colocação da mistura, houve efeito no sentido de mitigar a deterioração do rolamento. Nos restantes dias, foram efetuadas novas medições.

### 5.6.1. Teste de continuidade

O objetivo de realizar o teste de continuidade foi o de provar qual o componente que oferecia maior resistência elétrica, se o fio terra se o conjunto escova-pista. Caso se demonstrasse que o fio tinha menor resistência elétrica, então ficaria comprovado que as correntes passariam mais facilmente pelo fio que pelo conjunto escova-pista, danificando mais rapidamente o rolamento.

Tendo isto em conta, e estando já na *nacelle* do aerogerador 6, começou por se preparar o material para medir a resistência elétrica dos dois componentes. Para tal, foi utilizado o multímetro 179 da *Fluke*<sup>®</sup>, através da função de ohmímetro e um equipamento de testes multifunções 1650B igualmente da *Fluke*<sup>®</sup>, com a função teste de continuidade.

A execução do processo consistiu em ligar uma ponteira do aparelho à terra e outra à pista com e sem o fio terra colocado, como mostra a figura 5.16.

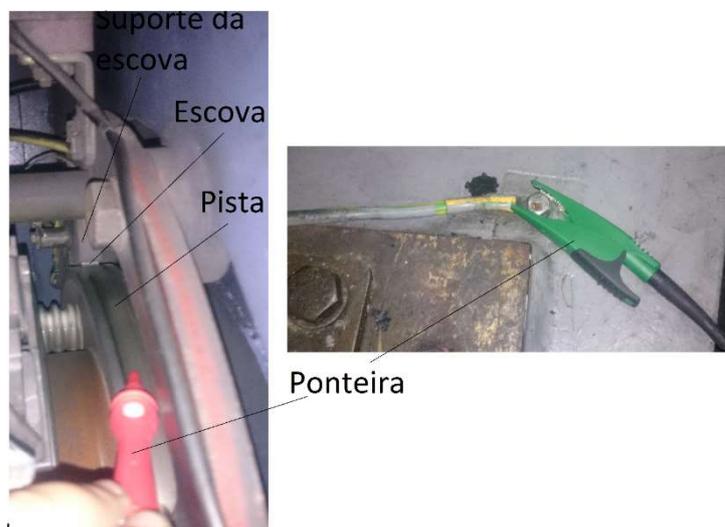


Figura 5.16. Posição das ponteiras durante a medição

Os resultados encontram-se na tabela infra descrita.

Tabela 5.9. Temperatura máxima do rolamento afetado

	Ohmímetro	Teste de Continuidade
Com escovas e fio terra ( $\Omega$ )	0.4	0.08
Com escovas e sem fio terra ( $\Omega$ )	0.4	0.14

É possível observar-se na primeira coluna de resultados a falta de precisão do multímetro face ao equipamento de testes multifunções, com este a apresentar resultados mais precisos. Relativamente à segunda coluna, confirmou-se que o sistema escova-pista oferece uma maior resistência elétrica do que o fio, sendo a diferença de quase o dobro.

Em seguida, após retirada do fio, realizaram-se as medições das vibrações, da temperatura instantânea do corpo do gerador e veio rápido e do ruído cujos resultados serão descritos no tópico subsequente. Todas as medições foram efetuadas com o aerogerador limitado a 1000 *rpm* para se conseguir a maior fiabilidade possível.

A mistura colocada no rolamento foi a mesma que no parque de Castanheiras, sendo apenas colocada uma bombada, pois os técnicos já tinham colocado massa, há pouco tempo, por altura da manutenção e a temperatura do rolamento aumenta se colocada uma quantidade excessiva.

### 5.6.2. Ensaio

Os resultados medidos com as aplicações *Multi Measures 2* e *Vibration Meter* antes e depois da colocação da mistura, no primeiro dia de ensaio são apresentados de seguida.

Da mesma forma que na medição no parque de Castanheiras, o telemóvel foi colocado com a sua aresta de cima encostada ao corpo do gerador. As vibrações no eixo dos Y não são exibidas por serem excessivas para se conseguir fazer uma leitura.

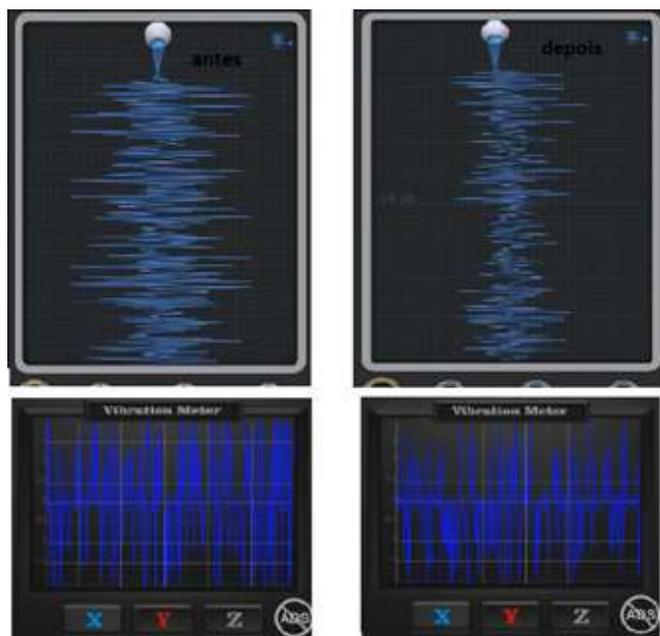


Figura 5.17. Vibrações no eixo dos X

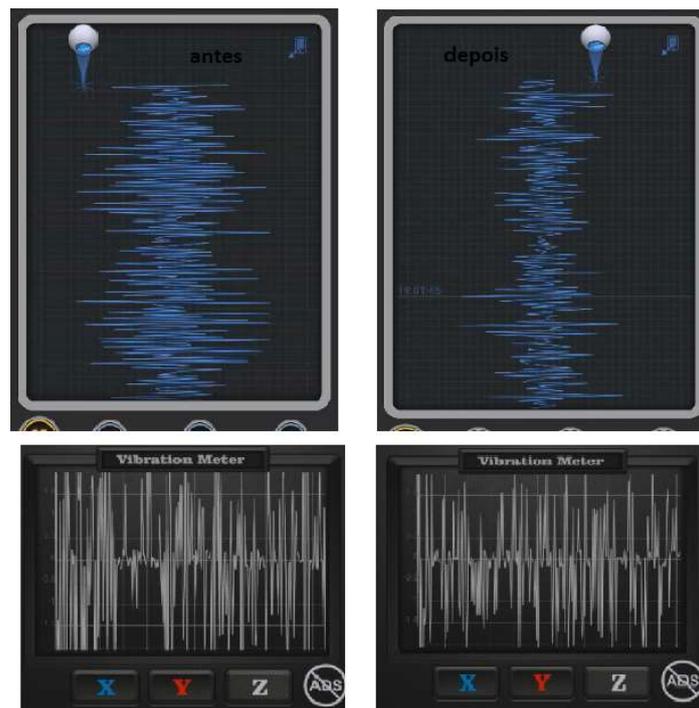


Figura 5.18. Vibrações no eixo dos Z

As temperaturas do rolamento captadas em imagem pela câmara termográfica são guardadas na sua memória interna e, através do seu próprio *software SmartView*, consegue-se saber as temperaturas em qualquer ponto da imagem fotografada, entre outras coisas.

As temperaturas do corpo do gerador e do acoplamento medidas antes da injeção da mistura estão representadas na figura 5.19.

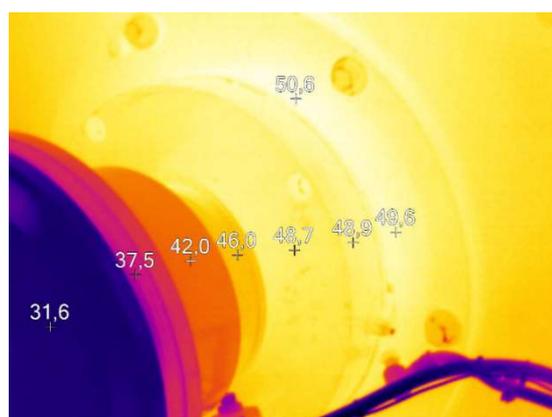
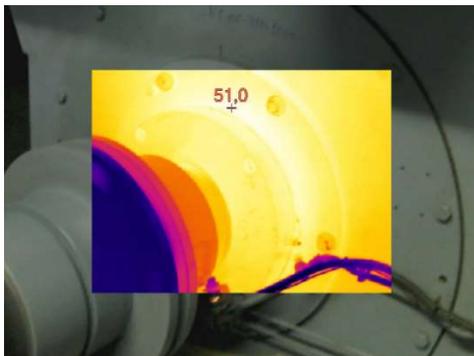


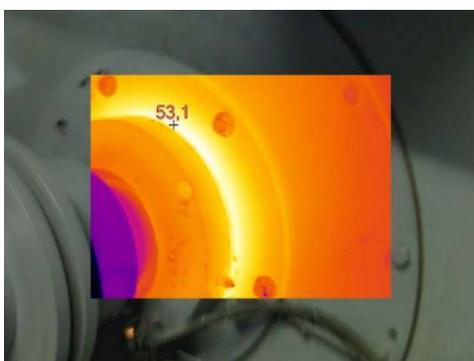
Figura 5.19. Marcação da temperatura do corpo do gerador e acoplamento em °C

O ponto mais quente está representado na figura 5.20.



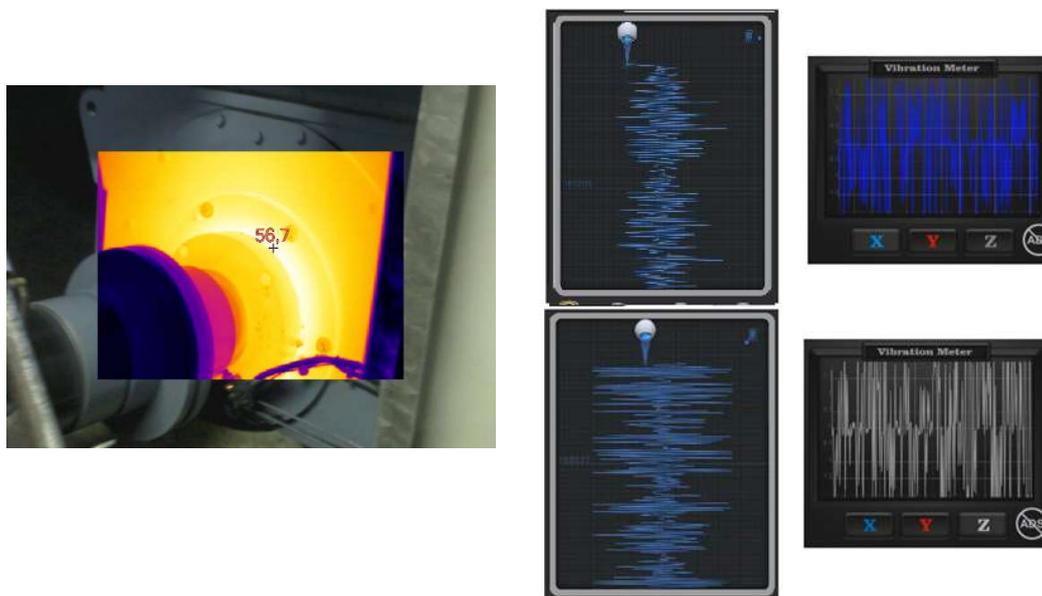
**Figura 5.20.** Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C

Depois de colocar a mistura, o ponto mais quente é o representado na figura 5.21.



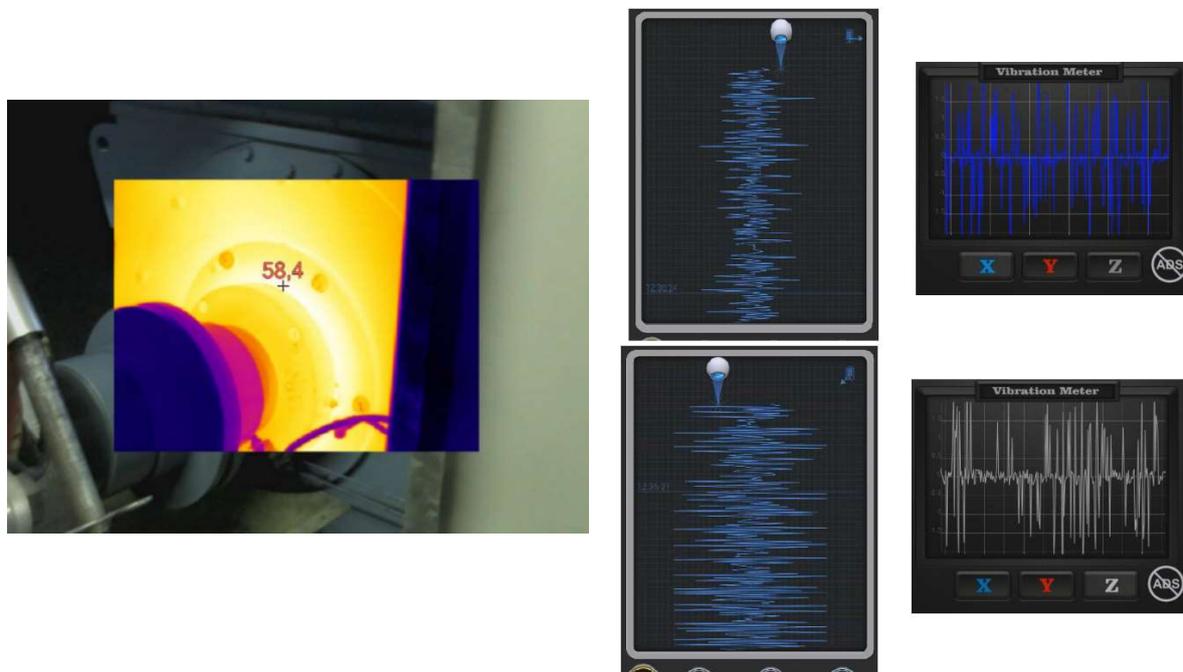
**Figura 5.21.** Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C

No dia seguinte, obtiveram-se os resultados das medições das vibrações e temperatura instantânea do corpo do gerador, representados na figura 5.22.



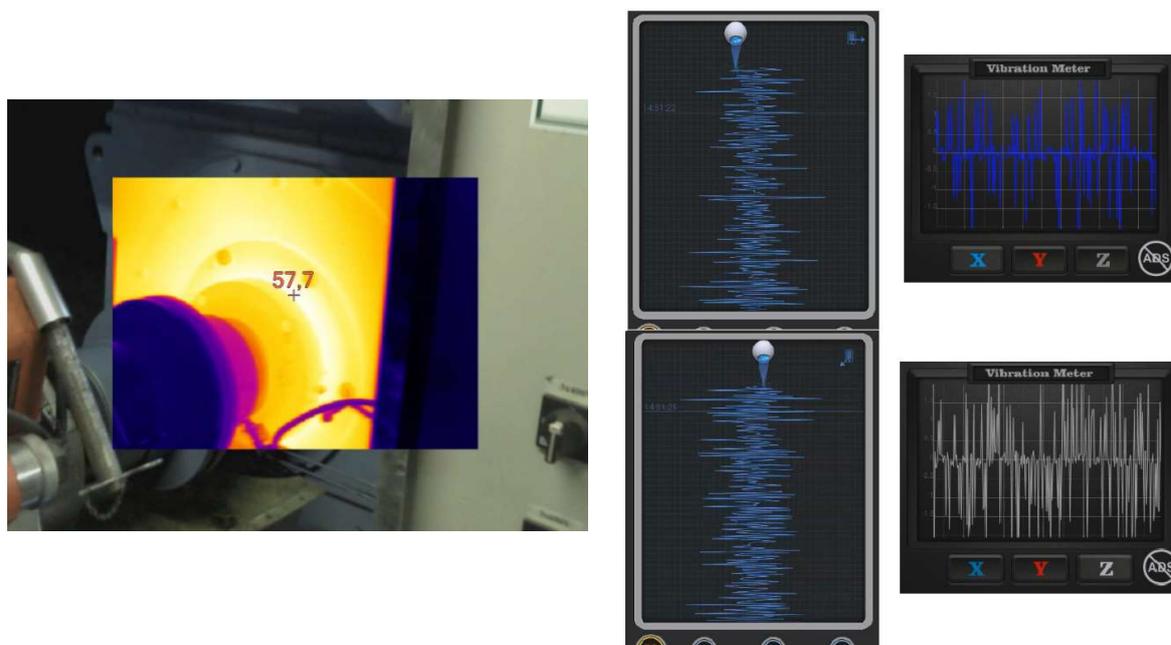
**Figura 5.22.** Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 3 do ensaio

Da mesma forma, no terceiro dia do ensaio, os resultados são apresentados na figura 5.23.



**Figura 5.23.** Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 3 do ensaio

No quarto e último dia do ensaio, os resultados são o da figura 5.24.



**Figura 5.24.** Marcação da temperatura mais alta do corpo do gerador e acoplamento em °C à esquerda e direita e as vibrações no eixo dos X e Z no dia 4 do ensaio

Registou-se igualmente neste dia a evolução da temperatura ambiente e do rolamento nos seis dias anteriores. Os valores foram obtidos através do ecrã do sistema de comando, onde as temperaturas máximas atingidas nesse dia estão representadas na tabela 5.10.

**Tabela 5.10.** Temperatura máxima ambiente e do rolamento nos dias prévios e durante o ensaio

<b>Data</b>	<b>2 Dias antes</b>	<b>1 Dia antes</b>	<b>Dia 1</b>	<b>Dia 2</b>	<b>Dia 3</b>	<b>Dia 4</b>
<b>T. Ambiente (°C)</b>	16	20	19	24	25	22
<b>T. Rolamento (°C)</b>	52	54	58	70	59	54

É de salientar que o valor da temperatura do rolamento é influenciado pelas horas de funcionamento do aerogerador, presumindo-se que se a turbina eólica estiver constantemente a funcionar, a temperatura do rolamento aumentará.

Por último, os valores do ruído medidos durante o ensaio pelo sonómetro encontram-se na tabela 5.11.

**Tabela 5.11.** Valores do ruído no decorrer do ensaio

<b>Data</b>	<b>Dia 1 (pré-medição)</b>	<b>Dia 1 (pós-medição)</b>	<b>Dia 2</b>	<b>Dia 3</b>	<b>Dia 4</b>
<b>Pot. Sonora medida (dBC)</b>	36.8	34.4	32.7	32.1	32.7

### 5.6.3. Conclusões do ensaio

Este último ensaio serviu para tentar perceber qual a melhor forma de agir quando algum técnico se deparar com este problema.

A mistura provoca no rolamento um pequeno aumento da temperatura, embora, este aumento não seja significativo pois a temperatura máxima para este tipo de rolamentos fica longe de ser atingida. Estas temperaturas estão em linha com as medidas noutros rolamentos, embora um pouco acima da média.

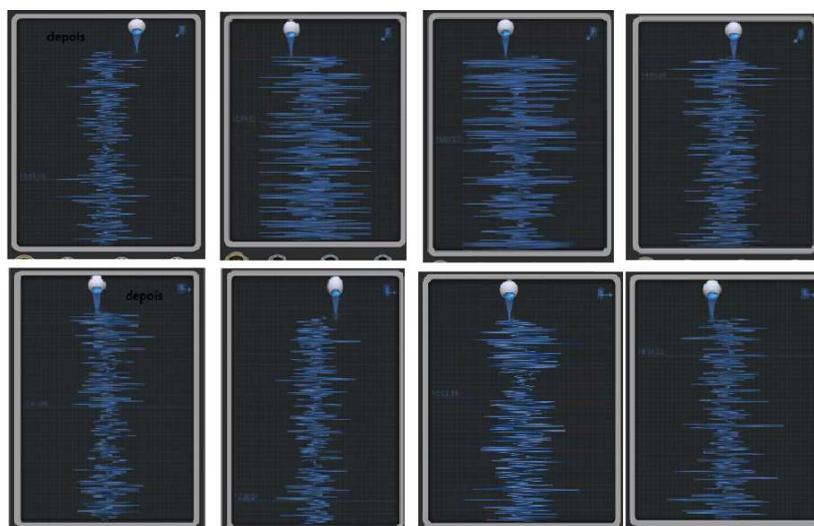
Embora a temperatura aumente nos primeiros dias após a colocação da mistura, ela acaba por diminuir, faltando mais dados para saber se ela estabilizou ou não. Mais uma vez se prova que a temperatura do rolamento é influenciável pela temperatura ambiente. Um

dato importante será saber se, nos dias em que a temperatura exterior for elevada e o aerogerador estiver a produzir, a temperatura aumenta para valores excessivos.

Quanto às vibrações, como se vê na figura 5.25, nota-se um ligeiro aumento nos dois dias seguintes à colocação da mistura, mas depois estabiliza novamente. Nota-se mais este facto no eixo dos Z do que nos do X, já que aí as vibrações medidas são mais constantes. No entanto prova-se que a colocação da mistura não diminui de imediato as vibrações do rolamento. Ter-se-ia de realizar medições num maior período de tempo.

O facto de não se conseguirem ler as medições no eixo dos Y leva a que se perca o eixo com as vibrações mais elevadas, podendo aí ser notória alguma diferença antes e depois de se colocar a mistura.

O facto de aplicações como estas não serem fidedignas o suficiente leva a que não possam ser consideradas para se tomar uma conclusão definitiva. A sua característica de não revelarem as unidades de medição contribui para isso, já que se perde aí um dato importante da dimensão das vibrações, pois as vibrações medidas devem ter uma discrepância enorme quando comparadas com as emitidas por um rolamento normal.



**Figura 5.25.** Conjunto das vibrações nos dias do ensaio. Eixo dos Z em cima e X em baixo

Por último, a medição da pressão sonora através do sonómetro resultou em resultados favoráveis à diminuição do ruído. No entanto, posteriormente conclui-se que o aparelho estaria danificado, pois comprovou-se que em silêncio ou criando grande ruído perto do microfone, os valores tanto em dBA como dBC não eram fidedignos, mantendo-se constantes. Havia também níveis de pressão sonora pré-definidos que se podiam alterar e, ao fazer isso, para a mesma dimensão de pressão sonora, o aparelho não mostrava qualquer valor, mantendo-se no 0dB.

## 5.7. Resistência das escovas

Para perceber o quanto as escovas influenciam a passagem de corrente elétrica, decidiu-se medir a resistência de uma escova nova e de uma escova já usada, que tivesse sido retirada da pista por já não ter o tamanho mínimo exigido.

Neste ensaio usaram-se escovas das fases, que se encontram ao lado das escovas terra, pelo facto de não haver escovas terra usadas disponíveis, embora como são fabricadas com o mesmo material, carbono, a experiência iria ser semelhante.

Assim, foi usado um multímetro semelhante ao da medição anterior com a função ohmímetro (figura 5.26), e mediu-se entre as duas extremidades da escova-suporte.

**Figura 5.26.** Medição da resistência elétrica das escovas com um multímetro



Os valores da medição encontram-se descritos na tabela 5.12.

**Tabela 5.12.** Valores da resistência elétrica de uma escova nova e usada

	Resistência elétrica ( $\Omega$ )
<b>Escova nova</b>	0.8
<b>Escova usada</b>	0.5

Comprova-se que a resistência óhmica é maior numa escova nova que numa usada, como seria de esperar.

Dos dados contidos nesta tabela podemos concluir que os técnicos, ao substituir as escovas terra, têm de ter em conta que estão a aumentar a resistência do sistema pista/escova. Se o gerador tiver o fio terra colocado, irá agravar a situação nos rolamentos, pois mais corrente irá atravessa-los.

## 5.8. Processo Tomada de Decisão

Finalizados os ensaios, é imperativo alcançarem-se resultados concretos. Quando os técnicos de operação e manutenção se depararem com um problema deste tipo, é necessário que se baseiem em algo de maneira a conseguirem resolve-lo da melhor forma possível. Assim, foi elaborado um processo de tomada de decisão de forma a facilitar todo este procedimento.

Quando é verificado que a resistência terra do gerador é  $0\Omega$  ou menor que  $500k\Omega$ , deve-se, em primeiro lugar, verificar a existência do fio terra na tampa do gerador. Se o problema persistir sem o fio ou se não houver fio nenhum em primeiro lugar, há a possibilidade de a tampa maior do gerador estar mal isolada permitindo assim a passagem da corrente elétrica pelo rolamento.

Esta tampa está presa ao corpo do gerador por 6 parafusos (figura 5.27) que, para não haver passagem por aqui, estão isolados através de anilhas de plástico. Para verificar se estas anilhas estão danificadas permitindo a passagem da corrente por aqui, o processo a ser feito será tirar um parafuso de cada vez e medir a continuidade entre a pista terra/veio (sem escovas).



Figura 5.27. Componentes das tampas dianteiras do gerador

Se se comprovar que há alguma anilha danificada, então substitui-se. Se não se identificar o problema, é provável que o problema seja do isolamento geral das tampas, feito em óxido de alumínio. Se isto se comprovar então a resolução passa por substituir o

rolamento por um em que os elementos rolantes sejam feitos de cerâmica. Se a resistência terra subiu para valores aceitáveis, então substitui-se por um rolamento normal. De salientar que a diferença de preços de um rolamento para o outro é seis vezes superior, sendo na ordem dos 3000€. Em ambos os casos, até à substituição do rolamento, é aconselhável que a lubrificação seja efetuada com a mistura da *Spanjaard*, já que desde que foi colocada no rolamento do aerogerador de Teixeira 6, o rolamento manteve-se estável e não foi reportado nenhum problema.

Em seguida, na figura 5.28, é apresentado o processo de tomada de decisão em esquema, como fonte de trabalho no terreno, caso surja a problemática solucionada durante o estágio.

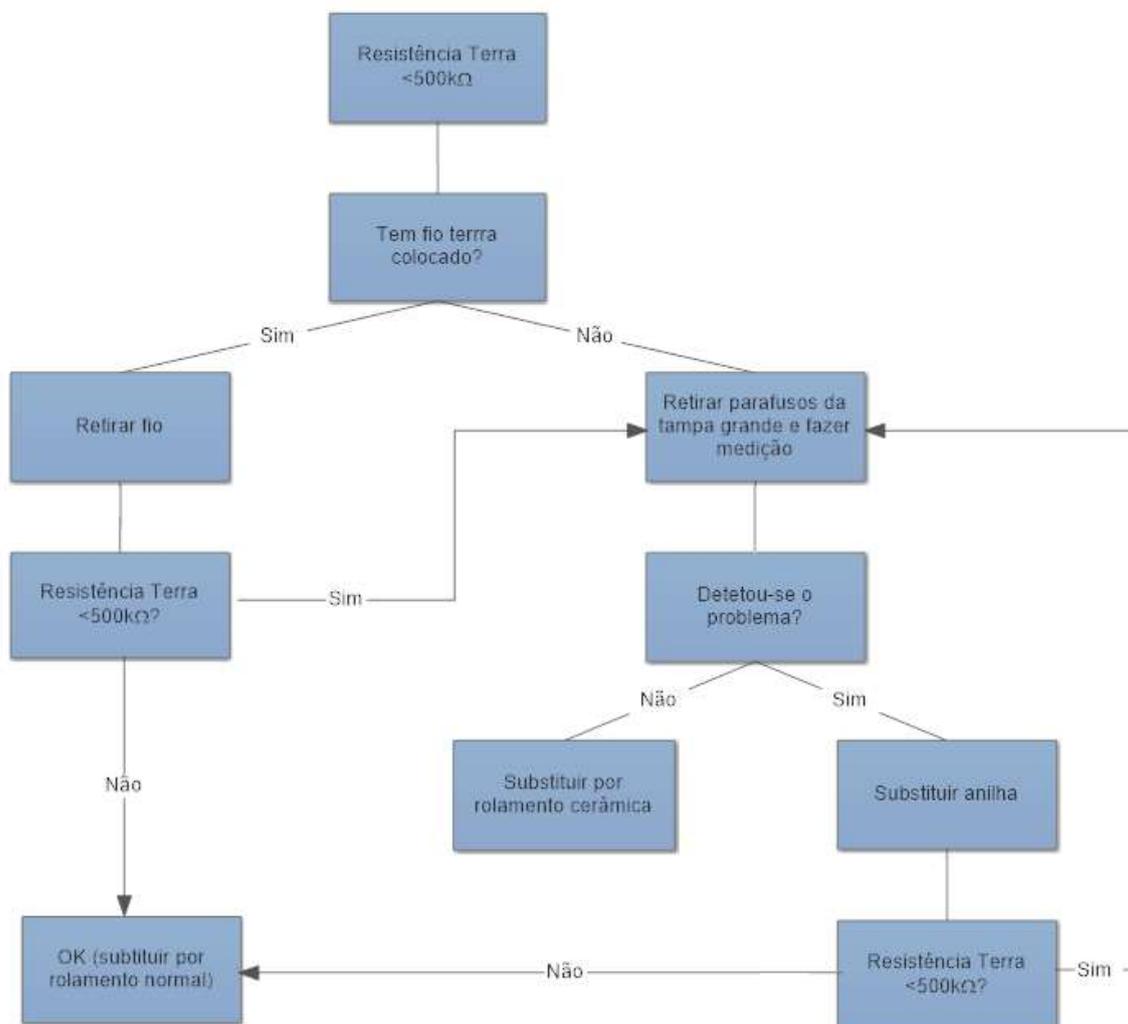


Figura 5.28. Processo tomada de decisão

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas experiências e ensaios com o intuito de saber qual a melhor forma de lidar com o problema dos rolamentos danificados do gerador dos aerogeradores. Já se conheciam previamente quais as causas, faltando estabelecer a melhor forma de agir perante esta situação.

Foram identificados quais os fatores primordiais que causavam a fadiga do rolamento, tendo sido feitos ensaios no sentido de perceber qual a evolução das medidas mitigatórias impostas.

Para se poder concluir se a mistura *Spanjaard* traz ou não benefício ao rolamento, será necessária uma monitorização constante da temperatura, vibração e ruído, tanto antes como depois da sua colocação.

O plano de lubrificação fica assim definido: colocar uma bombada de mistura, caso a relubrificação tenha sido inferior a três meses ou duas se superior a três meses. Para se otimizar este processo sugere-se expulsar a massa antiga do rolamento através de algum mecanismo de modo a que o rolamento fique com maior quantidade de mistura possível.

Se ficassem comprovados os benefícios da mistura a médio/longo prazo, então seria aconselhável que, em todos os geradores com resistência terra baixa, os rolamentos fossem lubrificados com esta mistura nas manutenções.

O processo de tomada de decisão deixado aos técnicos mostra o sucesso deste estágio nas soluções encontradas, sendo assim possível atuar de forma rápida e eficaz no sentido de resolver o problema.

Este estágio demonstrou-se uma mais-valia em progressos, já que à medida que decorria, iam surgindo novas incógnitas e resolvidas outras. A descoberta do fio terra e o que estava a causar revelou-se um elemento chave para a conclusão desta problemática que aliada à comprovação de certos fatores levou a que houvesse resultados concretos no final deste estágio, concluindo-se assim que os objetivos principais propostos para este trabalho foram cumpridos.

Há, no entanto, espaço para continuar este trabalho, já que melhores e mais eficientes soluções podem ser alcançadas.

---

Exemplo disso é o uso de um sensor de vibração ligado diretamente à tampa do gerador, no qual, quando fosse alcançado um determinado valor limite a calcular, era emitido um alarme pelo sensor, significando que as vibrações do gerador estão anormais.

Outra opção é o uso de lubrificação automática nos rolamentos do gerador. Surge como a forma ideal de evitar contaminações e de garantir que a lubrificação fosse feita da melhor forma possível, havendo assim um número mínimo de razões para que o rolamento se danifique. Isto iria suportar o argumento de que o rolamento se tenha danificado devido à fadiga provocada pela corrente elétrica e não por desgaste normal, já que nunca se consegue obter 100% certeza das causas que levaram à redução da sua vida útil. É relativamente fácil colocar isto em prática já que a empresa SKF fornece um *website* com esse intuito (SKF *DialSet – Relubrication calculation program*). Basta escolher o tipo de lubrificador e colocar os dados relativos ao rolamento e aos fatores a que está sujeito (1800rpm, 24 horas por dia, temperatura de operação normal, baixa contaminação, carga moderada, sem cargas de choque, temperatura ambiente média, veio horizontal e o anel externo sem rotação).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alenwine, K. e Chen, W., “Wind turbine generator failure modes analysis and occurrence,” in Wind Power 2010 Conference, Dallas (2010).
- Amirat, Y., Benbouzid, M. E. H., Al-Ahmar, E., Bensaker, B. e Turri, S. (2009), “A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems”, *Renewable Energy*, 13 2629-2936.
- Amirat, Y., Choqueuse, V. e Benbouzid, M. (2013) “EEMD-based wind turbine bearing failure detection using the generator stator current homopolar component”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41, 667-678.
- Associação de Energias Renováveis (2016), “Boletim das Energias Renováveis – 2015 – Dezembro (total anual)”, acessado em 31 de maio de 2016, em: <http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/boletim-das-energias-renovaveis/a-eletricidade-de-origem-renovavel-em-portugal-continental-3/>.
- Associação de Energias Renováveis e E2P (2016), “Parques Eólicos em Portugal – Dezembro de 2015”, acessado em 31 de maio de 2016, em: <http://www.apren.pt/pt/projetos/nacionais/e2p/>
- Chen, J., Pan, J., Li, Z., Zi, Y. e Chen, X. (2015), “Generator bearing fault diagnosis for wind turbine via empirical wavelet transform using vibrations signal” in *Renewable Energy*, 89 90-92.
- Enercon website (2016) “Enercon Products”. Acessado em 6 de maio de 2016, em: <http://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-103-ep2/> e <http://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>.
- Global Wind Energy Council (2016), “Global Wind Report 2015”, acessado em 30 de maio de 2016, em: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/>.
- Hau, Erich (2006), “Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics” 2ª Ed., Springer.
- Luoyang SBI Special Bearing Co., Ltd. Website (2016), “Rolamento de giro de esfera de contacto de quatro pontos de fileira dupla com o mesmo diâmetro”, acessado em 27 de junho de 2016, em: <http://www.sbibearings.com.pt/4-7-2-ball-four-point-contact-slewing-bearing.html>
- Oliveira, L. A., Lopes, A. G. (2012), “Mecânica dos Fluidos” 4ª Ed., Lidel.
- Senvion *GmbH* website (2016), “References & Case studies”. Acessado em 30 de maio de 2016, em: <https://www.senvion.com/global/en/wind-energy-solutions/references-case-studies/0>.

Senvion *GmbH* website (2016), “MM”. Acedido em 30 de maio de 2016, em: <https://www.senvion.com/global/en/wind-energy-solutions/wind-turbines/mm/>

Senvion *GmbH* website (2016), “MM92”. Acedido em 30 de maio de 2016, em: <https://www.senvion.com/global/en/wind-energy-solutions/wind-turbines/mm/mm92/>

SKF *website* (2016) “SKF DialSet – Relubrication calculation program” Acedido em 30 de junho de 2016, em: <http://www.mapro.skf.com/dialset/>

Whittle, M., Trevelyan, J. e Tavner, P. J. (2013), “Bearing currents in wind turbine generators” *Jornal of renewable and sustainable energy*, 5, 053-128.

Windfair *website* (2016), “Wind turbine Senvion MM92”. Acedido em 30 de maio de 2016, em: <http://w3.windfair.net/turbine/283-senvion-mm-92>

## ANEXO A

### Princípios físicos da conversão de energia eólica

A descrição que aqui vai ser apresentada tem por base o livro de Erich Hau (2006).

A energia mecânica que se consegue extrair de um escoamento de ar em movimento passando por uma determinada secção está restrita a uma certa percentagem da energia contida nesse escoamento. Esta descoberta, feita por Albert Betz demonstra que a extração ideal da potência só pode ser realizada a um determinado rácio entre o fluxo de energia contido no ar antes e depois de atravessar a turbina eólica.

Esta teoria, chamada “limite de Betz”, é assente em pressupostos simplificados, mas os seus resultados podem ser perfeitamente utilizados quando se trata de cálculos elaborados na engenharia prática. Vai ser apresentada seguidamente o seu conteúdo, tendo por base elementares formulações físicas.

A energia cinética de uma massa de ar em movimento,  $m$ , a uma certa velocidade  $v$  é expressa por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{A.1})$$

Considerando-se uma certa secção de área  $A$  através da qual passa ar a uma velocidade  $v$ , o caudal volúmico,  $\dot{V}$ , que a atravessa numa unidade de tempo é:

$$\dot{V} = vA \quad (\text{A.2})$$

O caudal mássico com densidade  $\rho$  é dado por:

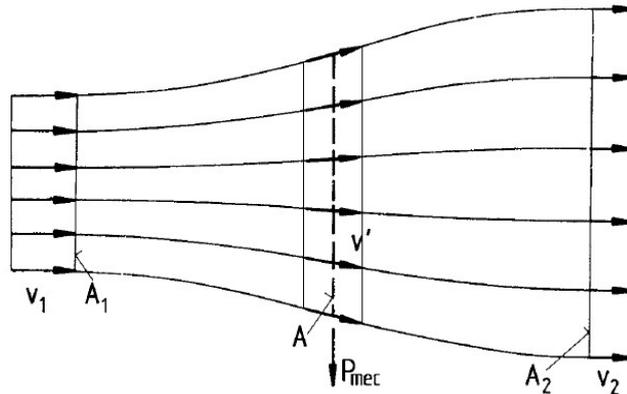
$$\dot{m} = \rho vA \quad (\text{A.3})$$

Estas equações expressam uma determinada energia contida no fluxo de ar, que é fisicamente idêntica à potência,  $P$ :

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (\text{A.4})$$

A pergunta fundamental é quanta energia mecânica pode ser extraída deste fluxo por uma turbina eólica.

Uma vez que a energia mecânica só pode ser extraída através da energia cinética contida no fluxo, isto significa que, como o caudal mássico é igual, a velocidade do fluxo antes da turbina tem de diminuir. Isto leva a que haja um alargamento da secção mesmo que o caudal mássico se mantenha constante. É assim necessário ter em conta as condições antes e depois do fluxo atravessar o aerogerador, Figura NA.1:



**Figura NA.1** – Condições do fluxo de ar em espaço aberto influenciado pela extração de energia mecânica

Aqui vê-se que  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades antes e após a passagem de um escoamento livre pela secção, o aerogerador.

A energia mecânica retirada pelo aerogerador ao fluxo corresponde à diferença da potência contida no fluxo antes e após a passagem pela turbina:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (\text{A.5})$$

A não variação do caudal mássico pressupõe que (equação da continuidade):

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (\text{A.6})$$

Assim,

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{A.7})$$

ou

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{A.8})$$

Desta equação verifica-se que a potência atingiria o seu máximo quando  $v_2$  fosse 0 implicando que deixaria de haver fluxo depois da turbina. Ora isto é fisicamente impossível, já que isto implicava que o fluxo antes teria de ser 0 também. Como seria de

esperar, um resultado fisicamente real consiste num certo rácio entre  $\frac{v_1}{v_2}$  onde a potência extraída atingiria o seu máximo.

Para se verificar esta situação é necessário outra equação que expresse a potência mecânica da turbina, como a lei de conservação do momento, em que a força que o fluxo de ar exerce no aerogerador é expressa por:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (\text{A.9})$$

De acordo com a terceira lei de Newton, esta força causada pelo fluxo no aerogerador, tem de ser contrariada por outra, vinda do aerogerador para o fluxo. Este impulso “empurra” o caudal mássico a uma velocidade  $v'$ , presente no plano onde o fluxo e a turbina coincidem. A potência necessária para isto é dada por:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (\text{A.20})$$

Assim, a potência mecânica extraída do fluxo deriva, por um lado, da diferença da energia antes e após o aerogerador e, pelo outro, do impulso e velocidade do fluxo. Colocando estas duas expressões em equações, fica, para uma velocidade  $v'$ :

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (\text{A.31})$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (\text{A.42})$$

Portanto a velocidade do escoamento que passa através da turbina é igual à média aritmética de  $v_1$  e  $v_2$ :

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{A.53})$$

Desta forma, o caudal mássico é dado por:

$$\dot{m} = \rho Av' = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2) \quad (\text{A.64})$$

A potência mecânica à saída do conversor pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (\text{A.75})$$

De forma a se ter uma referência para esta potência de saída, compara-se com um escoamento livre que flui através da mesma secção de área  $A$ , sem qualquer extração de potência. Esta potência é:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (\text{A.86})$$

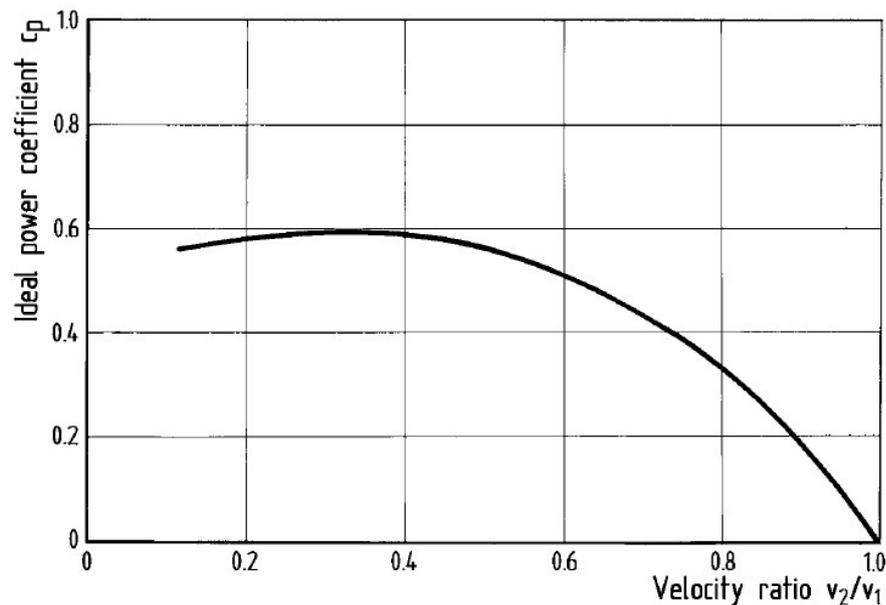
O rácio entre a energia mecânica extraída pelo conversor e aquela que é simplesmente um escoamento livre é chamado de “coeficiente de potência”,  $c_P$ :

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \quad (\text{A.97})$$

Depois de se simplificar a equação anterior de forma a que fique relativa ao rácio  $\frac{v_2}{v_1}$ , fica:

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right| \quad (\text{A.108})$$

O coeficiente de potência só depende agora do rácio de velocidades à entrada e saída da turbina. Colocando esta equação num gráfico, conclui-se que o coeficiente atinge um máximo a um certo rácio de velocidades, como demonstrado na figura NA.2:



**Figura NA.2** – Coeficiente de potência vs a velocidade do escoamento antes e após a passagem pelo aerogerador

Com  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ , o coeficiente de potência máximo é dado por:

$$c_p = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{A.119})$$

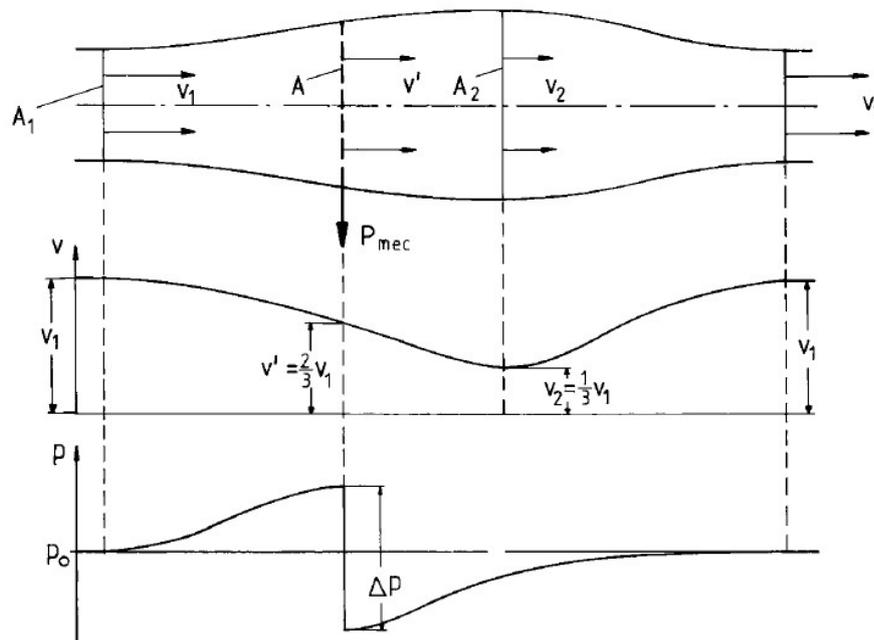
Sabendo que o máximo, coeficiente ideal, é atingido quando  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$  então a velocidade do escoamento em  $v'$  é:

$$v' = \frac{2}{3} v_1 \quad (\text{A.20})$$

O valor da velocidade do escoamento antes do aerogerador,  $v_2$ , pode agora ser calculado:

$$v_2 = \frac{1}{3} v_1 \quad (\text{A.212})$$

A figura NA.3 mostra novamente as condições do escoamento na passagem pela turbina eólica em grande detalhe. Além das linhas de corrente, as variações associadas à velocidade e pressão estática são indicadas.



**Figura NA.3** – Condições do escoamento ao atravessar um disco ideal de um aerogerador

Ao aproximar-se do plano da turbina, a velocidade de escoamento vai diminuindo até chegar a um valor mínimo, um pouco depois da turbina, aumentando rapidamente até ao valor inicial já muito depois da interseção. As linhas de corrente mostram um alargamento do tubo de escoamento até um máximo, coincidindo com o ponto de menos velocidade. Ao aproximar-se do aerogerador, a pressão estática aumenta passando

repentinamente para um valor baixo, da mesma envergadura que o aumento, passando depois para o valor normal da pressão atmosférica.

Convém salientar novamente que estas relações básicas foram deduzidas para um escoamento ideal, sem fricção e ignoradas as perdas por dissipação viscosa assim como o efeito de rotação comunicado ao fluido a jusante da interseção (Oliveira e Lopes, 2012). Em casos reais, o rendimento da turbina irá ser sempre mais baixo que o valor ideal de Betz, sendo por volta de 40%.

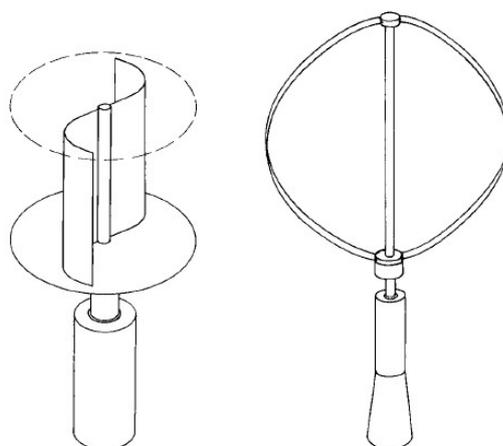
## ANEXO B

### Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal

Desde o século VIII que o Homem consegue extrair a energia contida no vento para as suas finalidades. Desde aí até ao século passado não houve grandes avanços, sendo que a partir desse momento, com o crescer da consciência da perigosidade dos combustíveis fósseis, o crescimento da necessidade de se produzirem energias “limpas” levou à constante evolução das turbinas eólicas.

Estas dividem-se em dois grandes grupos, dependendo se o seu eixo de rotação está numa posição vertical ou horizontal.

As turbinas eólicas de eixo vertical ainda hoje usadas são do tipo *Savonius* e *Darrieus*. As *Savonius* foram as primeiras a ser criadas, funcionando puramente através de arrasto. Um exemplo moderno deste eixo são os anemómetros de copo. Já as turbinas *Darrieus*, têm um melhor rendimento, mas padecem de um grande inconveniente: não conseguem arrancar sozinhas. Para obter a melhor situação é utilizado frequentemente o rotor *Savonius* montado no eixo do rotor *Darrieus* para assegurar, precisamente, o binário de arranque. Os dois tipos de turbina estão representados na figura NB.1.



**Figura NB.1** – Rotor do tipo *Savonius*, à esquerda e do tipo *Darrieus*, à direita

As turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais comuns, tendo a particularidade de serem obrigadas a ter um sistema que as permita alinhar o eixo de rotação com a direção do vento. Apesar disto ser uma desvantagem perante as de eixo vertical (que não precisam deste sistema), têm características que permitem que se sobreponham: a velocidade do rotor e a potência de saída podem ser regulados pelo sistema de rotação das pás do rotor no seu eixo longitudinal como mostra a figura NB.2, que as pás estão com ângulo de forma a que o vento tenha a menor influência possível sobre elas. Aliado a isto, este sistema é o mais eficaz contra ventos excessivamente rápidos, especialmente em turbinas de grande dimensão. Outro aspeto é o de que as pás do rotor possam ser aerodinamicamente otimizadas de forma a se conseguir atingir a máxima eficiência.



**Figura NB.2** – Aerogerador de eixo horizontal do parque eólico Teixeira

## ANEXO C

### Abordagem geral do mercado de energia eólica em Portugal

A produção de energia renovável em Portugal tem vindo a crescer fortemente ao longo dos últimos anos com o intuito de diminuir o peso dos combustíveis fósseis na fatura energética portuguesa.

A energia eólica teve um grande contributo para este objetivo, motivada pelos contributos da política europeia e nacional, já que nos últimos 15 anos a potência acumulada instalada chegou aos 5GW. Assim, segundo o relatório da Associação de Energias Renováveis, APREN, no boletim de dezembro de 2015 (total anual), mais de 48% da energia produzida em Portugal foi renovável. Dentro desse grupo, sem contar com a energia obtida pela grande hídrica, a energia eólica correspondeu a cerca de 22.5%, como mostra a figura NC.1.

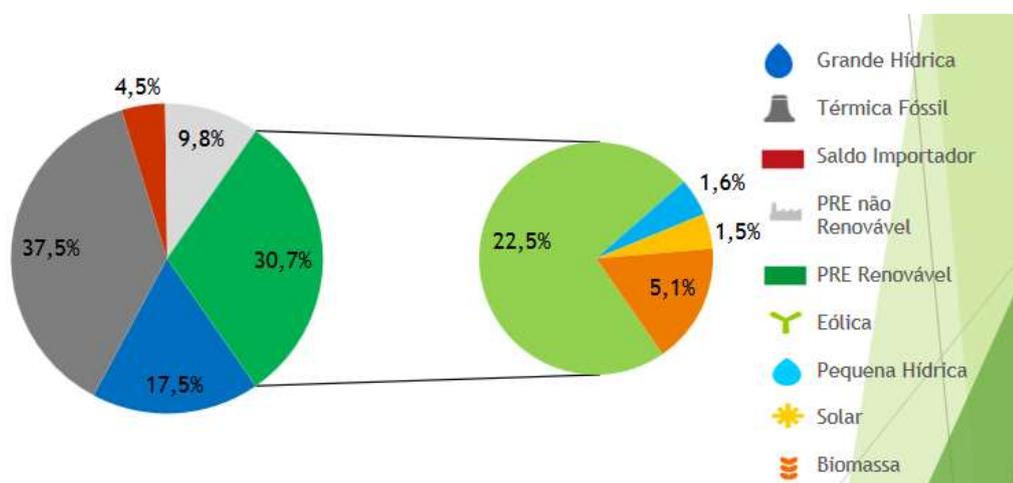


Figura NC.1. Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal Continental em 2015

De salientar que o distrito de Viseu é, de longe, o distrito com mais potência instalada do país, com mais de 1GW no final de 2016, como indica a figura NC.2.

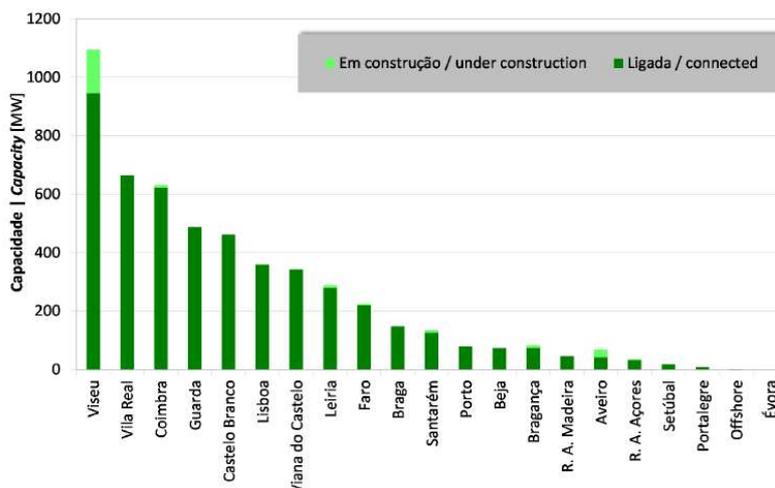


Figura NC.2 - Potência instalada por distritos e regiões autónomas em 2015

A figura NC.3, de acordo com o relatório da APREN, INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial e E2P (Energias Endógenas de Portugal) de dezembro de 2015, mostra que na Europa, Portugal encontra-se posicionando na nona posição em termos de potência instalada proveniente de energia eólica, sendo este um grande marco, visto o tamanho geográfico do nosso país.

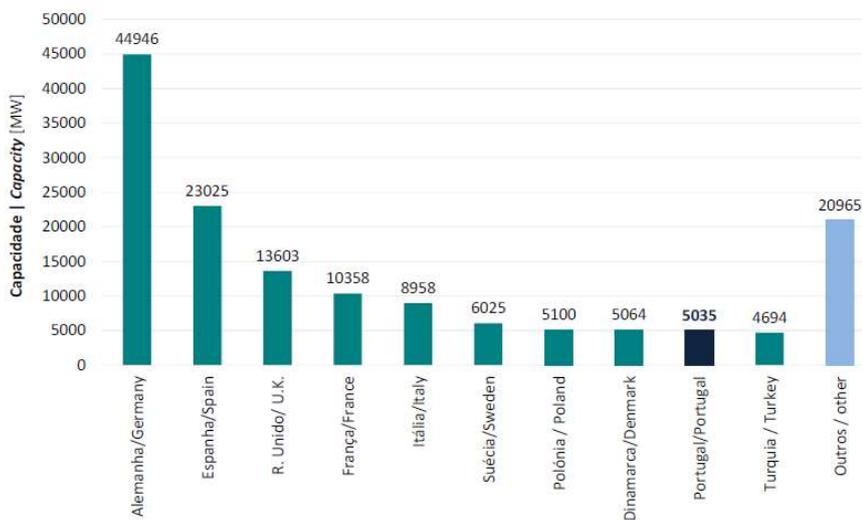


Figura NC.3 - Países com mais potência eólica instalada na Europa em 2015

Para se ter uma noção geral de quais são os países do mundo com maior energia eólica instalada, apresenta-se o seguinte gráfico da GWEC, Global Wind Energy Council, que mostra os 10 principais países produtores, no acumulado até ao ano de 2015, ilustrado na figura NC.4.

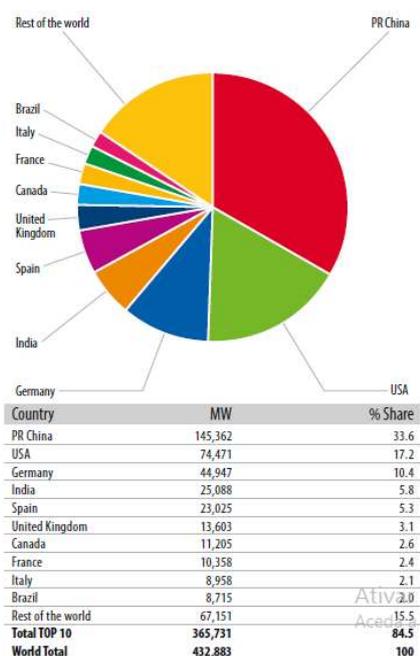


Figura NC.4 - Países com mais potência eólica instalada no mundo em 2015

No que toca a fabricantes, o mercado português é dominado pela Alemã *Enercon*, que detém 54% da cota de aerogeradores e quase 3GW instalados no território. Em segundo lugar está a empresa Dinamarquesa *Vestas* com 12.7% do mercado, seguindo-se a espanhola *Gamesa* com 9.3%. Em quarto lugar está a *Senvion* com 8.3% com quase 500kW de potência instalada. Com participação considerável encontra-se a *Nordex* (que se fundiu recentemente com a *Acciona*) com 7.8% e os restantes fabricantes totalizam cerca de 8%.

Por fim realça-se a posição dos promotores, os clientes dos fabricantes, sendo que os principais são: EDP Renováveis, Iberwind, Generg e Finerge que totalizam quase 3.2GW de potência instalada como indica a figura NC.5, retirada do relatório da APREN e E2P

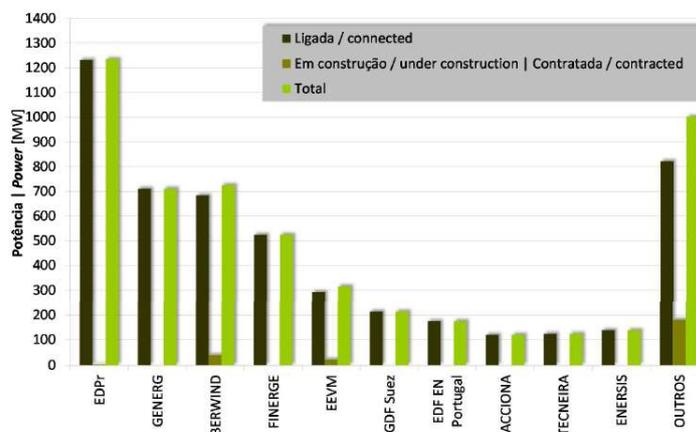


Figura NC.5 - Potência instalada dos promotores em 2015

## ANEXO D

### Oferta existente no mercado de aerogeradores em Portugal

Atualmente em Portugal existem variadas ofertas de aerogeradores à venda no mercado. Dependendo das características do local, o cliente tem de ajustar os valores medidos pela torre meteorológica ao aerogerador que melhor se enquadra. As escolhas podem ser variadas, sendo as variáveis a velocidade do vento, as variações de temperatura ao longo do ano e até se a poluição sonora é significativa (caso o aerogerador esteja perto de uma zona de habitação). Todos estes aspetos têm de ser ponderados para a escolha do aerogerador ser a melhor.

Irão ser descritos a seguir os 5 principais fabricantes no mercado português, que representam cerca de 92% do mercado, como ilustrado na figura ND.1 do relatório da APREN e E2P de dezembro de 2015.

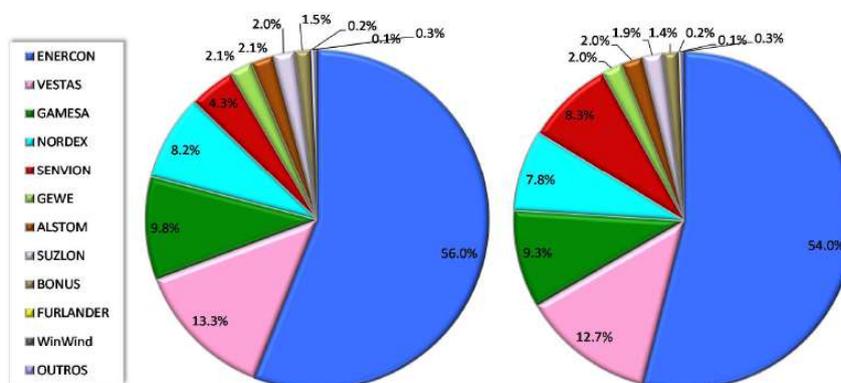


Figura ND.1 - Quota de mercado dos fabricantes em 2015

A empresa com mais peso no país, a *Enercon* oferece 4 grupos de aerogeradores, dependendo da potência pretendida. O número que se encontra na nomenclatura de cada modelo corresponde ao diâmetro do rotor desse modelo. Dentro desse modelo pode haver várias alturas da torre.

O Grupo EP1 engloba aerogeradores de potência à volta de 1MW. Tem três modelos: o E-44 (900kW), E-48 (800kW) e E-53 (800kW).

O grupo EP2 tem aerogeradores de potência à volta da 2MW. Os modelos são: E-103 EP2 (2.35MW, utilizado para localizações onde a velocidade do vento é fraco), o E-70 (2.3MW, otimizado para zonas costeiras com vento forte), E-82 (2.0MW, para zonas com vento médio a alto) e E-92 (2.35MW, para zonas onde a velocidade do vento varia consideravelmente).

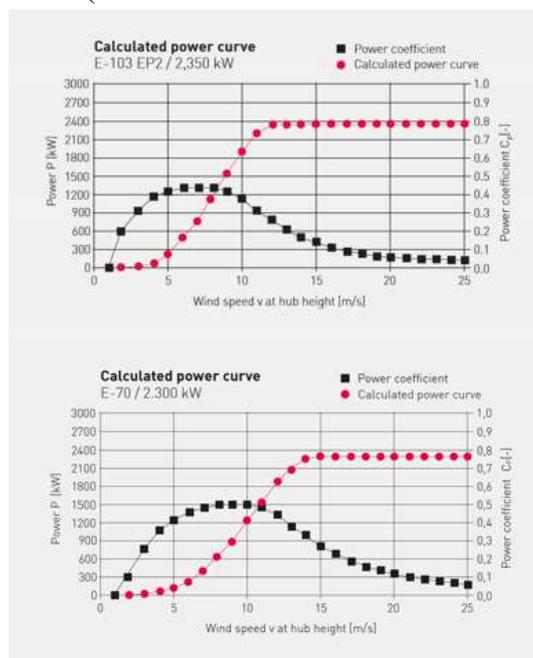
No grupo EP3 os aerogeradores têm potência à volta de 3.0MW. Tem dois modelos: E-101 (3.05MW) e o E-115 E2 (3.2MW, para zonas de velocidade média do vento fraco).

O grupo EP4 tem dois modelos: o E-141 EP4 (4.2MW, indicada para zonas de velocidade do vento fraco) e o E-126 EP4 (4.2MW, indicada para zonas de velocidades do vento médias).

Por último há o grupo EP8 que tem um só modelo, EP-126, que produz 7.58MW de potência que é indicado para localizações onde as condições do vento são muito boas (vento com velocidade média alta e constante).

Na figura ND.2 mostra-se a diferença da curva de potência de um aerogerador vocacionado para locais com velocidades do vento médias fracas (E-103) e fortes (E-70).

É interessante realçar que a *Enercon* é o único dos principais fabricantes em que os aerogeradores não têm caixa multiplicadora, pois logo a seguir ao *hub* encontra-se o gerador, sendo este síncrono (em todos os restantes fabricantes o gerador é assíncrono).



**Figura ND.2** - Diferença entre a curva de potência de um aerogerador E70 e E103 da fabricante Enercon (*Enercon website*)

A dinamarquesa *Vestas* é o segundo fabricante de aerogeradores com mais cota de mercado em Portugal. Produzem aerogeradores com duas gamas de potência, de 2.0MW e de 3.45MW. Dentro dos vários modelos há várias alturas da torre, dependendo dos valores medidos pela torre meteorológica, uma vez que os valores na nomenclatura do modelo correspondem ao diâmetro do rotor respetiva potência gerada.

Os modelos de 2.0MW são: V110-2.0MW, V100-2.0MW, V100-1.8/2.0MW e V90-1.8/2.0MW. Todos estes modelos são eficazes em baixo, médio e alta velocidade média do vento no local.

Já os modelos de 3.45MW correspondem a: V136-3.45MW para velocidades do vento fracas com muita turbulência, V126-3.45MW para locais onde a velocidade do vento seja baixa ou média, V117-3.45MW para velocidades do vento média a alta, V112-3.45MW para velocidades do vento alta e o modelo V105-3.45MW para locais onde a velocidade do vento seja alta com turbulência.

Em terceiro lugar no mercado português está a empresa espanhola *Gamesa* com 9.3% da cota do mercado no final de 2016.

Produz aerogeradores de 2.0MW, 2.5MW, 3.3MW e 5.0MW. Seguindo o mesmo raciocínio que o fabricante anterior, cada modelo tem várias alturas de torre, sendo que o número que aparece na nomenclatura corresponde ao diâmetro do rotor.

Dentro do Grupo de 2MW existem os seguintes modelos: G80, G87, G90, G97 e G114-2MW. A produzir 2.5MW estão os modelos G106, G114-2.5MW e G126. A gerar 3.3 MW existem somente o modelo G132-3.3MW. Por último, os modelos a produzir 5.0MW são G128 e G132-5MW. Dentro de cada grupo os modelos com diâmetro do rotor maior são vocacionados para locais onde a velocidade média do vento seja fraca e os de diâmetro menor para locais de vento forte.

Em quarto lugar no mercado português no fim de 2015, sendo ultrapassada pela *Senvion* durante o ano de 2016, está a *Nordex*.

Esta marca alemã oferece aerogeradores até 3.3MW passando por 2.4MW, 2.5MW e 3.0MW. Há apenas um modelo para produzir 2.4MW, o N117/2400. A gerar 2.5MW há os modelos N90/2500 e N100/2500. Os modelos N117/3000 e N131/300 produzem 3.0MW e o modelo N100/3300 gera no máximo 3.3MW de potência.

Por último surge a *Senvion*, que no presente ano irá ultrapassar a *Nordex* em potência instalada em território nacional representando, no final de 2016, 8.3% da cota do

---

país. Oferece três grupos de aerogeradores: o grupo MM, com 2MW de potência, o grupo 3.XM com potências dentro de 3MW e o grupo de aerogeradores exclusivos para *offshore*, o grupo 6.XM com potências dentro de 6MW. Todos os modelos têm, igualmente como os fabricantes anteriores, vários diâmetros de torre.

O grupo MM oferece três modelos: os modelos MM82 e MM92 que oferecem precisamente 2.05MW de potência e o modelo MM100 que gera 2.0MW. Cada um tem, respetivamente, 82, 92 e 100 metros de diâmetro de rotor.

O grupo 3.XM inclui vários modelos tais como o 3.0M122 que produz 3.0MW de potência e tem 122 metros de diâmetro do rotor, os modelos 3.2M114 CCV, 3.2M114 VG (sendo a sua diferença é que o modelo 3.2M114 CCV é unicamente usado em climas atmosféricos frios, conseguindo no máximo, operar em -30°C) e 3.2M122 geram 3.2MW de potência. Existem também os modelos 3.4M104, 3.4M114 e 3.4M140 EBC que produzem 3.4MW de potência.

O grupo 6.XM conta com dois modelos: o 6.2M126 e o 6.2M152. Cada um gera até 6.2MW de potência e tem 126 e 152 metros de diâmetro de rotor.

Todo o texto sobre os modelos dos aerogeradores aqui descritos foi retirado do respetivo *website* do fabricante no presente ano.

Cada fabricante tem a sua tecnologia específica e, muitas vezes, é esse o fator de decisão para quem tem de decidir que fabricante escolher, embora a fiabilidade e o histórico do fabricante sejam também elementos de peso na hora da decisão.

## APÊNDICE A

### Parques eólicos detidos pela *Senvion* Portugal

Apresenta-se neste apêndice os parques eólicos detidos pela *Senvion* Portugal começando no mais antigo até ao mais recente, até à data de julho de 2016.

**Tabela AP.1.** Parques ao cargo da manutenção da *Senvion* Portugal

1	Ribamar
2	Castanheiras
3	Teixeiró
4	Costa Vicentina
5	Tarouca
6	Valérios
7	Cela
8	Torrão
9	Marvila
10	Sobrado
11	Serra Alta
12	Vale Grande
13	Alto dos Forninhos
14	Raposeira
15	Picos Vale do Chão
16	Guardão
17	Moimenta
18	Sernancelhe
19	Três Marcos
20	Lousã II
21	Chão Falcão
22	Candeeiros
23	Bornes
24	Todo o Mundo
25	Pena Suar
26	Mosteiro
27	Picos Verdes
28	Santa Luzia
29	Bruxas