



# **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS AEROGERADORES EM SITUAÇÃO DE ANOMALIA**

**Sérgio Filipe Pereira Saraiva de Oliveira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica - Sistemas Eléctricos de Energia**

**Orientador:**

Professor Doutor Roque Filipe Mesquita Brandão



## **AGRADECIMENTOS**

Quero em primeiro lugar agradecer ao meu orientador da dissertação de mestrado, o Professor Doutor Roque Filipe Mesquita Brandão, pelo apoio, aconselhamento, orientação e disponibilidade que sempre me reservou.

Enquanto aluno do Instituto Superior de Engenharia do Porto, quero também agradecer a ajuda de todos os professores. A elaboração deste trabalho foi o culminar de um processo de aprendizagem com muito significado para mim, em termos pessoais e profissionais.

Um agradecimento aos colegas do curso, pela ajuda, companheirismo e amizade.

À minha mãe, ao meu irmão e a todos os amigos, pelo apoio incondicional que sempre me deram.



## RESUMO

Actualmente, a utilização de recursos energéticos renováveis é encarada como vital para se alcançar um desenvolvimento sustentável. Dentro destas, a energia eólica apresenta-se como uma das mais sustentáveis e, por isso, teve uma evolução exponencial nos últimos anos. No entanto, apesar da sua maturidade, esta tecnologia apresenta problemas e desafios. As turbinas eólicas apresentam uma elevada taxa de avarias em alguns componentes, nomeadamente a caixa de engrenagens, o gerador eléctrico e as pás.

Os tempos de paragem associados às avarias e à sua reparação provocam grandes prejuízos. De modo a evitar as falhas e a permitir a redução dos custos durante o ciclo de vida das turbinas eólicas, existe a necessidade de otimizar as estratégias de manutenção, de forma a maximizar o retorno do investimento nos parques eólicos.

Os aerogeradores mais recentes possuem sistemas de monitorização que permitem monitorizar todos os equipamentos constituintes da máquina, possibilitando um acompanhamento mais próximo do real estado de funcionamento dos equipamentos. A monitorização *online* permite que se reduza a possibilidade de acontecimento de uma falha grave.

Este trabalho de investigação analisa as avarias associadas a um dos equipamentos mais importante das turbinas eólicas, a caixa de engrenagens, tendo sido identificadas as principais grandezas que podem ser utilizadas para a previsão de avarias. Este equipamento é crítico dado que origina um dos maiores tempos de indisponibilidade por falha.

O resultado das análises efectuadas ao comportamento da caixa de engrenagens perante uma avaria demonstrou que é possível prevêê-las. Esta informação é de extrema importância, pois permite um escalonamento eficiente da manutenção e a adopção das estratégias de reparação mais convenientes.



## **ABSTRACT**

Currently, the use of renewable energy resources is faced as vital to achieve a sustainable development. Within these, wind energy is presented as one of the most sustainable, and therefore, had an exponential evolution in recent years. However, although its maturity, this technology presents problems and challenges. Wind turbines have a high failure rate in some components, particularly the gearbox, the electric generator and the blades.

The downtime associated with failures and repairs cause major losses. To avoid the faults and the increase of costs during the life cycle of wind turbines, the optimization of the maintenance strategies is needed in order to maximize the return on investment in wind farms.

The newer wind turbines have monitoring systems that allow monitoring all components of the machine, allowing a closer monitorization of the real state of the equipment, reducing the possibility of occurrence of a major fault.

This research analyzes the failures of one of the most important equipments in a wind turbine, the gearbox, and identified the main parameters which can be used for predicting faults. This is a critical equipment which has one the major causes downtime for failure.

The results of the analyzes of the gearbox behavior before a fault has shown that it is possible to predict them. This information is extremely important because allows an efficient scheduling of maintenance and the adoption of the best repair strategies.



# ÍNDICE

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	III
Abstract .....	V
Índice .....	VII
Índice de figuras .....	IX
Índice de tabelas .....	XI
Abreviaturas e simbolos .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Considerações gerais.....	3
1.2. Objectivos da dissertação .....	4
1.3. Estrutura da dissertação .....	4
2. ENERGIA EÓLICA E SISTEMAS DE CONVERSÃO .....	7
2.1. Enquadramento da energia eólica .....	9
2.1.1. Energia eólica no mundo.....	9
2.1.2. Energia eólica em Portugal.....	11
2.2. Estado da arte na conversão eólica.....	14
2.2.1. Turbinas eólicas - <i>Offshore</i> .....	16
2.3. Características da energia eólica.....	17
2.3.1. Limite de <i>Betz</i> .....	18
2.3.2. Potência eólica .....	19
2.4. Tipos de turbinas.....	22
2.4.1. Turbina de eixo horizontal .....	22
2.4.1.1. Geradores de Indução - Aerogeradores com caixa de engrenagens .....	23
2.4.1.2. Geradores Síncronos - Aerogeradores sem caixa de engrenagens.....	24
2.4.2. Turbina de eixo vertical.....	26
2.5. Caixa de engrenagens .....	26
2.6. Geradores eléctricos .....	29
2.6.1. Máquina de Corrente Contínua ou DC.....	29
2.6.2. Máquina de Corrente Alternada .....	30
2.6.2.1. Máquina Síncrona .....	30
2.6.2.2. Máquina de Indução ou Assíncrona.....	33
2.6.2.2.1. Máquina de Indução com o Rotor em Gaiola .....	34
2.6.2.2.2. Máquina de Indução Duplamente Alimentada (Rotor Bobinado) .....	35

3.	AVARIAS NOS AEROGERADORES.....	39
3.1.	Manutenção nos aerogeradores.....	41
3.2.	Avárias mais importantes nos aerogeradores .....	45
3.2.1.	Pás .....	50
3.2.2.	Caixa de engrenagens .....	53
3.2.3.	Gerador .....	56
3.3.	Sistemas de monitorização e detecção de avarias. Sistema SCADA .....	61
3.4.	Medidas obtidas pelo sistema SCADA.....	63
4.	ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE AEROGERADORES EM SITUAÇÃO DE ANOMALIA.....	65
4.1.	Caso de estudo .....	67
4.2.	Avárias analisadas .....	67
4.3.	Método de análise desenvolvido .....	68
4.4.	Análise dos resultados.....	69
4.4.1.	Aerogeradores sem avarias.....	69
4.4.2.	Aerogeradores com avarias.....	74
4.5.	Conclusões.....	82
5.	CONCLUSÃO .....	83
	BIBLIOGRAFIA.....	87
	ANEXOS .....	93
	ANEXO A.....	95
	ANÁLISE DO AEROGERADOR 11.....	95
	ANEXO B .....	99
	ANÁLISE DO AEROGERADOR 3 .....	99
	ANEXO C .....	103
	ANÁLISE DO AEROGERADOR 5 .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Potência total instalada no mundo desde 1996 [3].	9
Figura 2 – Nova potência instalada anualmente no mundo desde 1996 [3].	10
Figura 3 - Nova potência instalada durante o ano de 2011, no mundo [3].	10
Figura 4 - Potência total instalada no final de 2011, no mundo [3].	11
Figura 5 - Distribuição das fontes primárias de produção de energia eléctrica, no ano de 2011 e 2010, em Portugal [7].	12
Figura 6 - Distribuição das fontes renováveis e não renováveis na produção de energia eléctrica, no ano de 2011 e 2010, em Portugal [7].	12
Figura 7 - Capacidade geradora e número de aerogeradores em Dezembro de 2011, em Portugal [5].	13
Figura 8 - Aerogerador de <i>Charles F. Brush</i> [10].	14
Figura 9 - Turbina <i>Gedser</i> [11].	15
Figura 10 - Evolução do tamanho e da potência instalada das turbinas eólicas ao longo do tempo [13].	16
Figura 11 - Representação do fluxo de ar que acciona a turbina eólica [25].	17
Figura 12 - Relação entre as densidades de potência: disponível no vento, captada por uma turbina eólica ideal (limite de <i>Betz</i> ) e convertida em eléctrica por um determinado aerogerador real [25].	19
Figura 13 - <i>European wind atlas</i> [25].	20
Figura 14 - Curva característica potência/velocidade do vento para uma turbina V80 - 2.0MW [49].	21
Figura 15 - Aerogerador com caixa de engrenagens <i>Vestas</i> [9].	23
Figura 16 - Aerogerador sem caixa de engrenagens <i>Enercon</i> [8].	25
Figura 17 - Turbina de eixo vertical do tipo <i>Darrieus</i> [25].	26
Figura 18 - Engrenagem de dentes retos, engrenagem helicoidal e helicoidal dupla [37].	27
Figura 19 - Caixa de engrenagens paralela e planetárias [38].	28
Figura 20 - Caixa de engrenagens planetária [39].	28
Figura 21 - Esquema de ligações dos geradores eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável da <i>Enercon</i> [8].	31
Figura 22 - Potência activa e reactiva fornecida por um gerador de energia eólica equipado com gerador síncrono funcionando a velocidade variável [50].	33
Figura 23 - Característica binário versus velocidade da máquina de indução em três modos de funcionamento [50].	34
Figura 24 - Curvas características binário-velocidade para diferentes valores da resistência do rotor [50].	35
Figura 25 - Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [15].	36
Figura 26 - Classificação da manutenção [22].	41
Figura 27 - Comparação entre os três tipos de manutenção (Correctiva, Preventiva Sistemática e Preventiva Condicionada) no tempo [23].	43
Figura 28 - Descrição dos intervalos de manutenção <i>Enercon</i> [16].	44
Figura 29 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques finlandeses [23].	46
Figura 30 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques suecos [23, 28].	46
Figura 31 - Taxa de avarias no Reino Unido e Holanda [29].	47

Figura 32 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques alemães [31].	48
Figura 33 - Desenvolvimento da taxa de falhas durante o tempo de operação [31].	48
Figura 34 - Características das avarias e tempo de paragem dos parques alemães [31].	49
Figura 35 - Modelização de um desequilíbrio nas massas das pás [32].	51
Figura 36 - Fissuras numa pá [34].	52
Figura 37 - Substituição de uma pá [35].	52
Figura 38 - Protecção contra descargas atmosféricas nas turbinas eólicas modernas [33].	53
Figura 39 - Instalação de uma caixa de engrenagens [41].	54
Figura 40- Gerador eléctrico de um aerogerador [44].	57
Figura 41 - Origem das falhas nos geradores eléctricos [45].	58
Figura 42 - Avarias mais frequentes nos geradores eléctricos e suas causas [45].	58
Figura 43 - Aplicação de películas isolantes às espiras [47].	60

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classe dos aerogeradores [48]. .....	21
Tabela 2 – Comparação de métodos de manutenção [23]. .....	42
Tabela 3 - Lista de grandezas medidas pelo sistema SCADA.....	64
Tabela 4 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10.....	69
Tabela 5 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10. ....	70
Tabela 6 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10 (cont.). ....	71
Tabela 7 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 2.....	72
Tabela 8 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 2.....	73
Tabela 9 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11.....	74
Tabela 10 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11. ....	75
Tabela 11 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11 (cont.). ....	76
Tabela 12 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.....	77
Tabela 13 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.....	78
Tabela 14 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.....	79
Tabela 15 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 5.....	80
Tabela 16 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 5.....	81
Tabela 17 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 11. ....	97
Tabela 18 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 11. ....	97
Tabela 19 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 11. ....	98
Tabela 20 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 3. ....	101
Tabela 21 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 3. ....	101
Tabela 22 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 3. ....	102
Tabela 23 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 5. ....	105

Tabela 24 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 5. ....	105
Tabela 25 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 5. ....	106

## ABREVIATURAS E SIMBOLOS

A	Área
AC	Corrente Alternada
AvgCurrent	Intensidade de corrente média
AvgPower	Potência média produzida
AvgTemp1	Temperatura ambiente
AvgTemp2	Temperatura do sistema hidráulico
AvgTemp3	Temperatura do óleo da caixa de engrenagens
AvgTemp4	Temperatura do estator do gerador eléctrico
AvgTemp5	Temperatura do slip ring
AvgTemp6	Temperatura dos rolamentos
AvgTemp7	Temperatura do quadro de controlo das pás
AvgTemp8	Temperatura no interior da nacelle
AvgVoltage	Valor médio da tensão
AvgWindSpeed	Velocidade média do vento
Cp	Coeficiente de potência
DC	Corrente Contínua
Ec	Energia cinética
EN	European Norm
Fc	Força Centrífuga
I	Intensidade de corrente
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor

ISET Fraunhofer	Institute for Wind Energy and Energy Systems Technology
m	Massa
NP	Norma Portuguesa
P	Potência activa
Pdisp	Potência disponível transportada pelo vento
Pmec	Potência disponível no eixo da turbina
PWM	Pulse-Width Modulation
R	Resistência
r	Raio
rpm	Rotações por minuto
s	Deslizamento
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
slip-ring	Anéis de contacto
T	Binário
V	Tensão
$v_i$	Velocidade do vento no ponto i
$\rho$	Massa específica do ar

# **1. INTRODUÇÃO**



## 1.1. Considerações gerais

Desde sempre, o homem tem aproveitado os recursos naturais disponíveis para seu benefício próprio. Os fenómenos que causam a movimentação das massas de ar, que originam os ventos, são resultantes da energia proveniente do aquecimento não uniforme do planeta pelos raios solares e pelo movimento de rotação da Terra.

Este tipo de energia é utilizada desde há milhares de anos para produzir trabalho, seja para movimentar embarcações, a bombagem de água para irrigação ou para drenagem e a moagem de grãos para produção de farinhas. A energia mecânica resultante da conversão da energia eólica era utilizada localmente, para a realização de trabalho mecânico.

As primeiras tentativas para a produção de electricidade de uma forma industrial, surgiram no final do século XIX (Setembro de 1882), com *Thomas Edison*, que construiu o primeiro sistema eléctrico de energia, em *Manhattan*, a partir da *Pearl Street Station*. Desde essa altura assistiu-se a uma procura crescente desse tipo de energia. Unanimemente, a energia eléctrica é considerada como um factor decisivo para o desenvolvimento industrial e económico de uma nação.

A energia eléctrica pode ser obtida a partir de dois grandes grupos: as fontes de energia renováveis e as fontes de energia não renováveis.

As fontes de energia não renováveis (combustíveis fósseis e nucleares) apresentam alguns problemas, nomeadamente o facto de se tratar de recursos extinguíveis, pela produção de grandes quantidades de resíduos (em determinados tipos de combustíveis) e pelo lançamento para a atmosfera de substâncias poluentes e de dióxido de carbono em resultado da sua queima. No caso português, acresce ainda o facto de sermos fortemente importadores de combustíveis fósseis, o que origina a saída de divisas do país. Problemas relacionados com a poluição, o aquecimento global, o efeito de estufa, a diminuição da camada do ozono e as chuvas ácidas são devidos, em parte, às emissões para a atmosfera da queima destes combustíveis.

As fontes de energia renováveis resultam da constante renovação na Natureza. São exemplos disso, o vento (energia eólica), as águas em movimento ou armazenadas (energia hídrica), o sol (energia solar térmica e fotovoltaica), as marés (energia das marés), as ondas do mar (energia das ondas), os géiseres (energia geotérmica), biocombustíveis e as matérias orgânicas (energia da biomassa). As energias renováveis tornaram-se assim um complemento às energias tradicionais, reduzindo os custos derivados da sua aquisição e ajudando a reduzir as emissões de gases nocivos provenientes da queima das mesmas.

Nos últimos anos, uma consciencialização global para os problemas ambientais, aliada ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis e à crescente necessidade de energia, levou à necessidade de procurar novas fontes de energia, mais limpas e baratas. Na produção total de energia no Mundo, cerca de 80% resulta da utilização de fontes de energia não renováveis [1], sendo este um facto muito preocupante. Na União Europeia, e particularmente em Portugal, pretende-se que as energias renováveis assumam um papel cada vez mais importante na satisfação dos consumos de electricidade.

## **1.2. Objectivos da dissertação**

Este trabalho de dissertação tem como objectivo perceber o comportamento de algumas grandezas relacionadas com aerogeradores de parques eólicos, nomeadamente a temperatura do óleo na caixa de engrenagens, perante a existência de anomalias identificadas. As grandezas foram registadas pelo sistema SCADA, tendo-se procedido à sua análise comportamental.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Este trabalho de dissertação está organizado em seis capítulos, apresentados da seguida de forma.

No capítulo 1, é feita uma breve introdução à dissertação, aos seus objectivos e à sua estrutura.

O capítulo 2 faz uma abordagem à actual situação da energia eólica, às suas normas e à legislação portuguesa. É feita a evolução histórica da energia eólica sendo também apresentadas as características deste tipo de energia e dos sistemas de conversão existentes.

O capítulo 3 faz uma abordagem aos esquemas de manutenção dos parques eólicos. É apresentado um estudo sobre as avarias mais frequentes nos aerogeradores. Foram apresentados os três equipamentos (pás, caixa de engrenagens e gerador eléctrico) que envolvem os maiores tempos de paragem, mais custos e meios, em caso de reparação. Finalmente foram apresentados os sistemas SCADA dos parques eólicos.

O capítulo 4 apresenta o método de análise desenvolvido, de modo a perceber o comportamento da caixa de engrenagens do aerogerador, perante a existência de anomalias identificadas, com o objectivo de detecção de avarias.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho de dissertação.

Deste trabalho fazem ainda parte alguns anexos, que demonstram o resultado das análises efectuadas às grandezas, nomeadamente a temperatura do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, assim como uma bibliografia.



## **2. ENERGIA EÓLICA E SISTEMAS DE CONVERSÃO**



## 2.1. Enquadramento da energia eólica

O interesse pelas energias renováveis, nomeadamente a eólica, surgiu pela crescente necessidade de energia, mas teve um impulso considerável com a crise internacional do petróleo na década de 70, do século passado. Só por essa altura é que houve um assinalável interesse e investimento, que possibilitasse o desenvolvimento de equipamentos capazes de produzir energia eléctrica, com qualidade de serviço, à escala comercial. Acresce ainda uma consciencialização global para os problemas ambientais que levou, nas últimas décadas, a um rápido aumento da produção de energia proveniente de fontes renováveis. Estas são hoje consideradas como complemento aos combustíveis fósseis (petróleo, carvão ou gás natural).

Tem-se assistido a um rápido desenvolvimento da tecnologia das turbinas eólicas o que tem permitido o fabrico de turbinas cada vez mais potentes. Acresce ainda a existência de parques eólicos de grandes dimensões, o que faz com que este recurso natural tenha cada vez mais importância na produção de energia a nível mundial.

A taxa de crescimento da potência eólica instalada a nível mundial tem tido um crescimento exponencial. No final de 1996, a potência eólica instalada no mundo era de 6,1 GW, tendo passado para 238,4 GW no final de 2011 [3].

### 2.1.1. Energia eólica no mundo

Em termos globais, a capacidade total instalada (Figura 1) e a construção de novas instalações (Figura 2) com recurso à energia eólica tem crescido substancialmente nestes últimos anos [3].

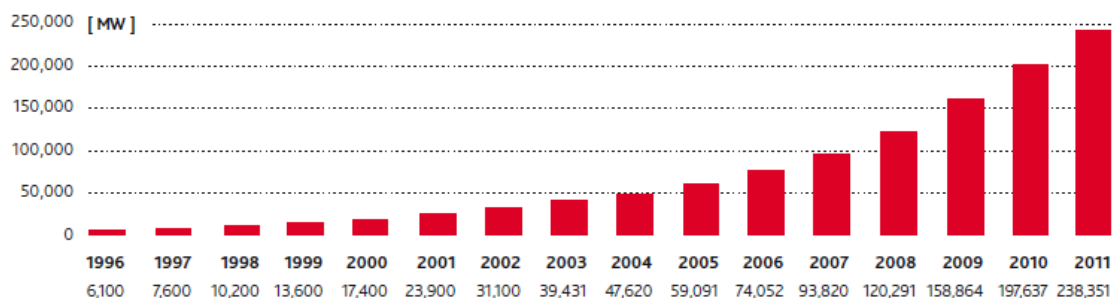


Figura 1 - Potência total instalada no mundo desde 1996 [3].

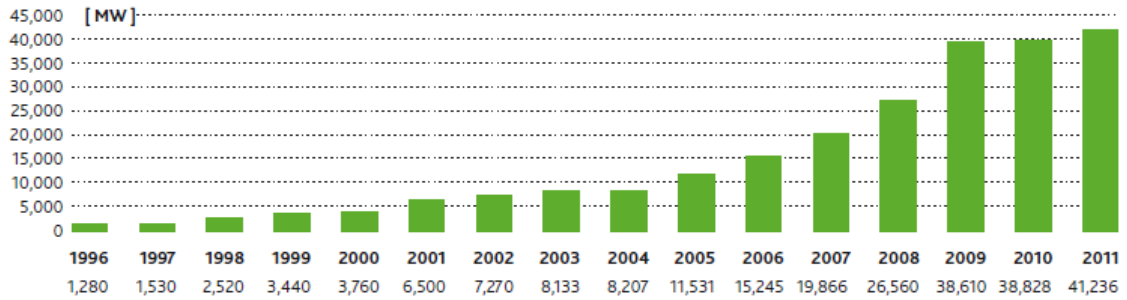


Figura 2 – Nova potência instalada anualmente no mundo desde 1996 [3].

A exploração destes recursos tem sido liderada por três regiões no mundo, a Europa, a Ásia e a América do Norte. Em termos de capacidade instalada durante o ano de 2011, a China lidera confortavelmente na construção de novas instalações (Figura 3), com uma quota de mercado de 43,7%, seguido dos Estados Unidos da América com 16,5% e pela Índia com 7,3%. Também em termos cumulativos (Figura 4), a China lidera com uma quota de mercado de 26,3%, seguido dos Estados Unidos da América com 19,7% e pela Alemanha com 12,2% [3].

País	MW	Percentagem
China	18000	43,7%
USA	6810	16,5%
Índia	3019	7,3%
Alemanha	2086	5,1%
Reino Unido	1293	3,1%
Canadá	1267	3,1%
Espanha	1050	2,5%
Itália	950	2,3%
França	830	2,0%
Suécia	763	1,9%
Resto do mundo	5168	12,5%
<b>Top 10</b>	<b>36068</b>	<b>87,5%</b>
<b>Mundo</b>	<b>41236</b>	<b>100,0%</b>

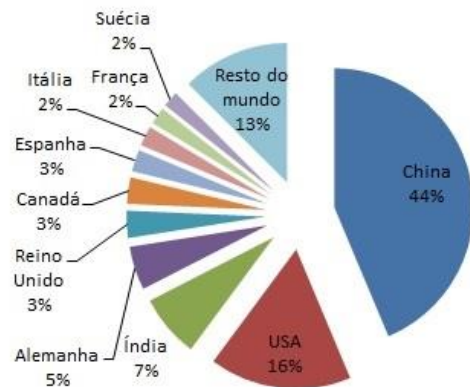


Figura 3 - Nova potência instalada durante o ano de 2011, no mundo [3].

País	MW	Porcentagem
China	62733	26,3%
USA	46919	19,7%
Alemanha	29060	12,2%
Espanha	21674	9,1%
Índia	16084	6,7%
França	6800	2,9%
Itália	6747	2,8%
Reino Unido	6540	2,7%
Canadá	5265	2,2%
Portugal	4083	1,7%
Resto do mundo	32446	13,6%
<b>Top 10</b>	<b>205905</b>	<b>86,4%</b>
<b>Mundo</b>	<b>238351</b>	<b>100,0%</b>

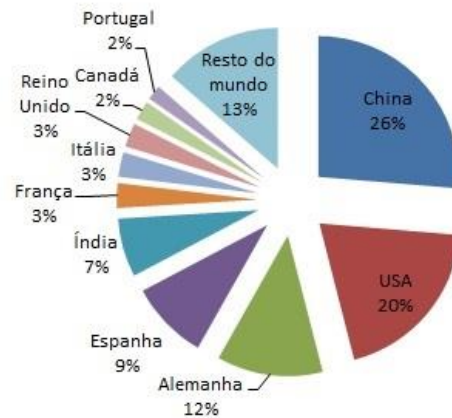


Figura 4 - Potência total instalada no final de 2011, no mundo [3].

### 2.1.2. Energia eólica em Portugal

O Decreto-Lei nº189/88 de 27 de Maio foi a primeira legislação publicada com vista ao desenvolvimento do sector das energias renováveis em Portugal. Este documento estabelecia normas relativas à actividade de produção de energia eléctrica por produtores independentes [2]. Esta legislação mobilizou significativos investimentos privados, nos domínios da produção mini-hídrica e da cogeração, não se tendo verificado o mesmo relativamente à energia eólica. Havia em relação à energia eólica algum cepticismo. A tecnologia estava ainda em fraco desenvolvimento e o conhecimento do potencial eólico do país era limitado. Estes acontecimentos condicionaram o investimento nesta tecnologia. Actualmente a situação é radicalmente diferente. A evolução constatada em Portugal, não deve ser encarada como um acontecimento isolado no panorama europeu, dado que, está relacionado com os objectivos traçados pela União Europeia de desenvolvimento das energias renováveis. Em 27 de Setembro de 2001, o Parlamento Europeu aprovou a Directiva 2001/77/CE, relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes renováveis de energia no mercado interno da electricidade [6]. O objectivo primordial desta Directiva foi criar as condições necessárias ao aumento significativo de produção de electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis na União Europeia. Esta previa a instalação de 2500 a 3000 MW de energia eólica no horizonte de 2010. Esta directiva e ainda a publicação de outra legislação permitiu que Portugal depressa se tornasse num dos países com maior desenvolvimento eólico a nível mundial.

A figura 5 mostra a distribuição das fontes de energia primária na produção de energia eléctrica nos anos de 2011 e 2010, em Portugal [7].

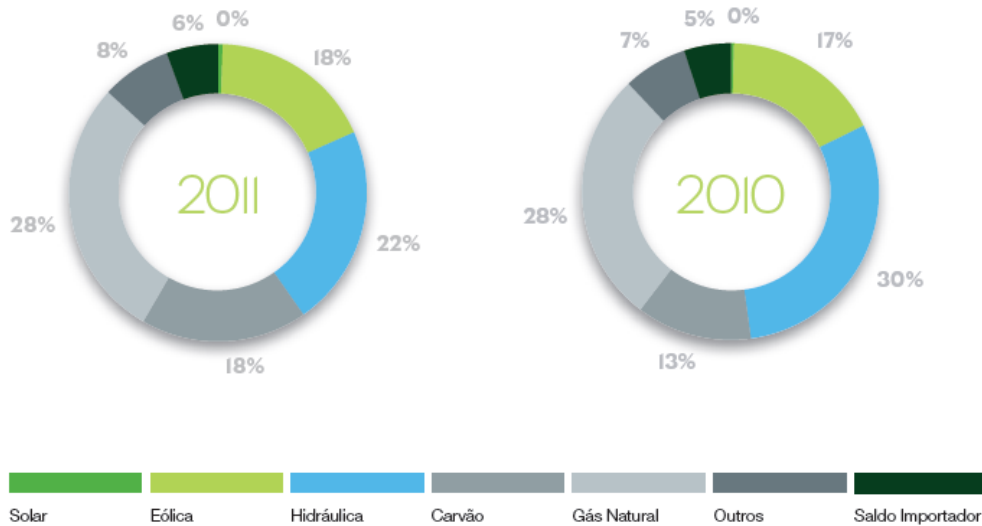


Figura 5 - Distribuição das fontes primárias de produção de energia eléctrica, no ano de 2011 e 2010, em Portugal [7].

A figura 6 mostra a evolução da distribuição das fontes de energia renováveis e não renováveis, na produção de energia eléctrica, nos anos de 2011 e 2010, em Portugal [7].

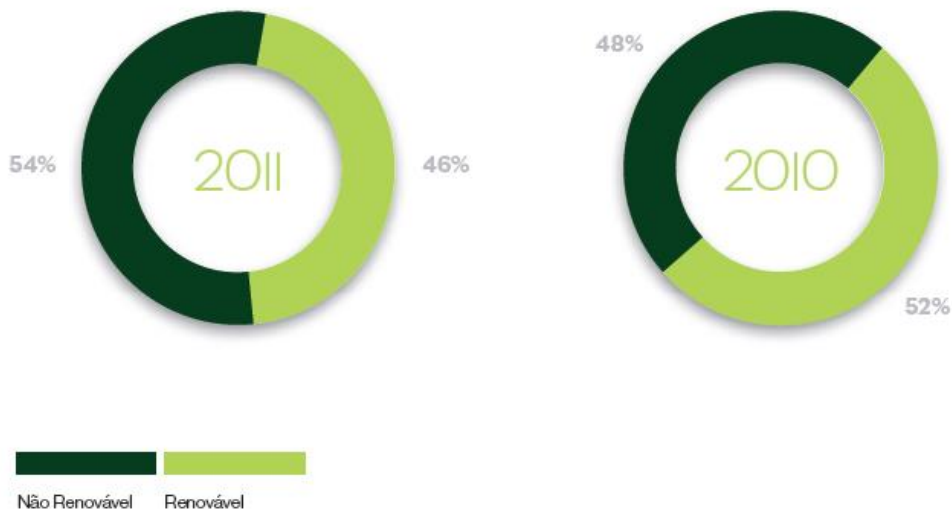


Figura 6 - Distribuição das fontes renováveis e não renováveis na produção de energia eléctrica, no ano de 2011 e 2010, em Portugal [7].

Em 2011 a potência eólica ligada à rede pública aumentou 375 MW relativamente ao ano anterior, totalizando no final do ano 4081 MW, correspondentes a uma

potência instalada de 4603 MVA. Concluíram-se vários parques eólicos no país. No final do ano, ligou-se também o primeiro aerogerador instalado *offshore*, de águas profundas, ao largo da Póvoa de Varzim. Durante o ano de 2011 reforçaram-se e remodelaram-se outros parques eólicos em Portugal. Da potência eólica ligada actualmente à rede pública, 47% está ligada à Rede de Transporte e 53% à Rede de Distribuição. A potência eólica representava 22% da potência total ligada no Sistema Eléctrico Nacional, no final de 2011. A soma de todas as fontes de energia renováveis constitui 54% da potência total. A produção de origem renováveis abasteceu 46% do consumo, sendo os 9,0 TWh de produção eólica responsáveis pelo abastecimento de 18% do consumo. Estes valores são inferiores aos do ano anterior, registados em condições meteorológicas excepcionais. A utilização da potência ligada nos parques eólicos situou-se no ano de 2011 em 26%, correspondentes a um índice de produtividade de 0,97, estabelecido com base no regime médio observado no período 2001-2010 [4].

Em termos de potência eólica, Portugal tem actualmente instalado 4372.8 MW (Figura 7), repartidos por quase trezentos parques eólicos e mais de duas mil máquinas [5].

PARQUES EÓLICOS EM PORTUGAL WIND FARMS IN PORTUGAL	Ligados à rede <i>Grid connected</i>		Em construção <i>Under construction</i>		TOTAL <i>Total</i>	
	MW	Máq. WEcs	MW	Máq. WEcs	MW	Máq. WEcs
CONTINENTE MAINLAND	4308.7	2239	11.0	6	4319.7	2245
MADEIRA MADEIRA	44.3	66	0.0	0	44.3	66
AÇORES AZORES	19.9	44	9.7	11	29.6	55
<b>TOTAL TOTAL</b>	<b>4372.8</b>	<b>2349</b>	<b>20.7</b>	<b>17</b>	<b>4393.5</b>	<b>2366</b>

Figura 7 - Capacidade geradora e número de aerogeradores em Dezembro de 2011, em Portugal [5].

## 2.2. Estado da arte na conversão eólica

*Charles F. Brush* (1849-1929) é um dos fundadores da indústria eléctrica americana. Durante os anos de 1887-1888, *Charles F. Brush* construiu o que actualmente se considera a primeira turbina eólica para geração de electricidade (Figura 8). Esta turbina era gigantesca, com um rotor de diâmetro de 17 metros. A turbina funcionou durante 20 anos e utilizava um gerador corrente contínua (DC) para carregar um banco de baterias, colocadas na cave de sua casa. Apesar do tamanho da turbina, o gerador produzia apenas 12 kW. Isto devia-se ao facto de as turbinas terem uma velocidade de rotação reduzida e um peso elevado [10].

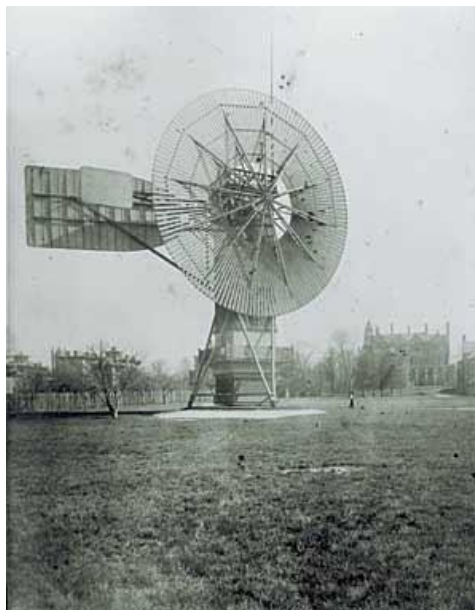


Figura 8 - Aerogerador de *Charles F. Brush* [10].

Mais tarde, o dinamarquês *Poul la Cour* descobriu que as turbinas eólicas com poucas pás no rotor eram mais eficientes para a produção de electricidade, em virtude de atingirem uma velocidade de rotação mais elevada. *Poul la Cour* (1846-1908), que era originalmente um meteorologista, acabou por se transformar num dos pioneiros da aerodinâmica moderna, construindo as primeiras turbinas eólicas modernas. Construiu também um túnel de vento para experiências. É também dele a primeira publicação no mundo dedicada à energia eólica. As suas turbinas de vento tinham valores típicos compreendidos entre 20 a 35 kW.

Entre os anos de 1940 e 1956, realizam-se desenvolvimentos importantes, a nível aerodinâmico e ao nível dos materiais utilizados. Este desenvolvimento permitiu o

aparecimento de novos aerogeradores. Em 1951, o gerador de corrente contínua (DC) foi substituído por um gerador assíncrono de corrente alternada (AC), de 35 kW.

O engenheiro *Johannes Juul* foi um dos primeiros alunos de *Poul La Cour*, quando este leccionava os seus cursos para *Wind Electricians* em 1904. Na década de 1950 (1956-57), *Johannes Juul* tornou-se pioneiro no desenvolvimento da primeira turbina eólica, utilizando um gerador assíncrono de corrente alternada (AC). Esta inovadora turbina eólica, *Gedser* (Figura 9), produzia 200 kW, tinha três pás, um sistema electromecânico capaz de orientar a turbina com o vento e um gerador assíncrono de corrente alternada (AC). Foi um projecto pioneiro, influenciando decisivamente o desenvolvimento das turbinas eólicas modernas. A turbina, que durante muitos anos foi a maior do mundo, funcionou durante 11 anos sem manutenção [11].



Figura 9 - Turbina *Gedser* [11].

Quanto à capacidade de geração, as primeiras turbinas eólicas desenvolvidas não tinham capacidade para produzir mais que algumas dezenas de kW (Figura 10).

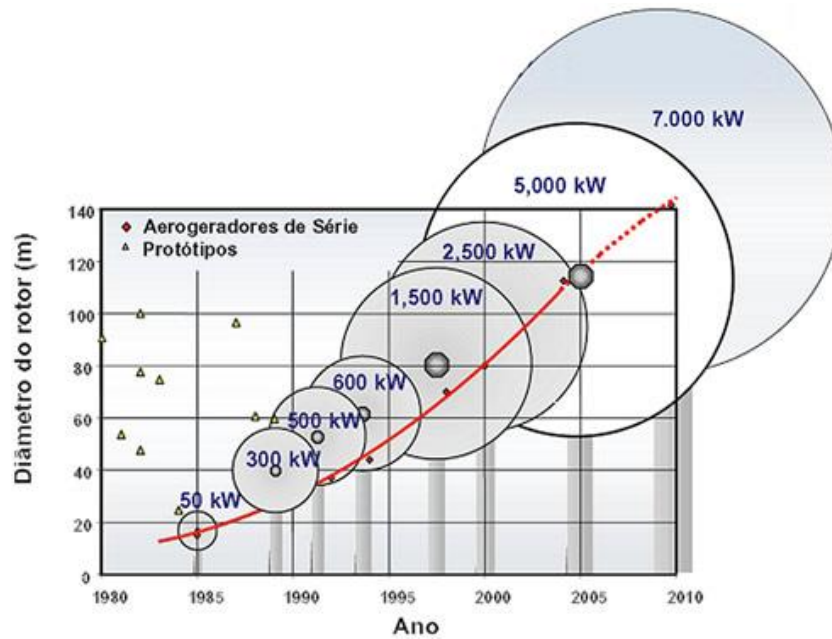


Figura 10 - Evolução do tamanho e da potência instalada das turbinas eólicas ao longo do tempo [13].

As primeiras turbinas eólicas comerciais foram instaladas no início dos anos 80, do século XX, na Europa e nos EUA, tendo tipicamente potências de 50 a 100 kW. No início dos anos 90, do mesmo século, a capacidade das turbinas era da ordem de 300 kW. Actualmente, o aerogerador comercializado com maior capacidade é o modelo E-126 de 7,58 MW. Este aerogerador tem um rotor com 127 m de diâmetro e uma torre que pode atingir os 135 m de altura.

### 2.2.1. Turbinas eólicas - *Offshore*

Uma área onde se têm registado grandes avanços é na instalação de turbinas eólicas no mar (*offshore*). A tendência para o aumento da potência das turbinas, aliado a um melhor conhecimento da tecnologia das fundações que suportam as turbinas e das condições de vento no local, estão a contribuir para tornar mais competitiva esta forma de aproveitamento.

A geração de energia eólica, *onshore* e *offshore*, tem diferenças substanciais, não só na localização geográfica, mas também em questões técnicas e económicas. Os recursos eólicos, o custo das instalações e a tecnologia das turbinas eólicas são algumas dessas questões.

Normalmente, os recursos eólicos *offshore* são superiores, quantitativamente e qualitativamente, aos recursos eólicos *onshore*, uma vez que, as condições do vento são mais favoráveis. A rugosidade do mar apresenta valores mais baixos que a rugosidade em terra, o que faz com que a variação da velocidade do vento com a

altura seja pequena, logo, sem necessidade de torres elevadas. Por outro lado, o vento no mar é menos turbulento do que em terra, contribuindo assim para um ciclo de vida útil mais prolongado para as turbinas.

Outra diferença significativa entre a produção de energia eólica *onshore* e *offshore* é o custo das instalações. O custo das estruturas de fundação dos parques eólicos *offshore* é muito superior aos parques eólicos *onshore*. A competitividade da produção de energia eólica *offshore* está dependente da resolução dos problemas de instalação destas turbinas em águas profundas. A construção das fundações é difícil e dispendiosa. O custo das instalações de ligação à rede é também mais elevado nas instalações *offshore*.

A tecnologia das turbinas eólicas usadas em parques eólicos *onshore* e *offshore* é muito semelhante. A principal diferença reside na sua potência. Devido aos recursos eólicos superiores, os parques *offshore* usam turbinas com maior potência instalada, em comparação com os parques *onshore*. A interligação dos parques eólicos *offshore* à rede eléctrica é semelhante à dos parques eólicos *onshore*. Normalmente, os parques eólicos *offshore* são ligados a uma subestação localizada em terra utilizando cabos submarinos.

### 2.3. Características da energia eólica

Uma turbina eólica converte a potência disponibilizada pelo vento em potência mecânica, actuando sobre as pás do rotor. A quantidade de energia que o vento transfere para o rotor depende da densidade do ar, da área do rotor e da velocidade do vento. Na realidade, a turbina eólica vai desviar o vento, mesmo antes de este atingir as pás do rotor. Isto significa que uma turbina eólica nunca será capaz de capturar toda a energia do vento (limite de *Betz*). A figura 11 representa o fluxo de ar que acciona a turbina eólica.

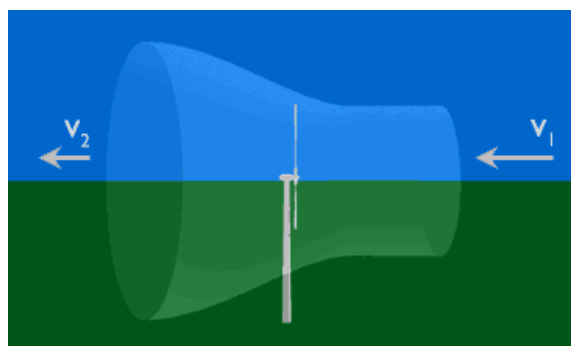


Figura 11 - Representação do fluxo de ar que acciona a turbina eólica [25].

O rotor de turbina eólica deve abrandar o vento, capturando a sua energia cinética, convertendo-a em energia mecânica (energia rotacional). Para haver conversão de energia, o vento que passa pela zona de acção da turbina, tem que perder velocidade. Desse modo, a velocidade ( $v_2$ ) tem que ser inferior a ( $v_1$ ). No entanto, se ( $v_2$ ) for igual a zero, ou seja, se o vento perder toda a sua energia cinética ao passar pelas pás, também não haverá conversão de energia.

### 2.3.1. Limite de Betz

A potência disponível na massa de ar em movimento não é totalmente convertida em potência mecânica. A lei de *Betz* calcula a potência máxima que pode ser extraída a partir do vento, por uma turbina eólica, independentemente da sua concepção. Foi publicada em 1919, pelo físico alemão *Albert Betz*. A lei deriva dos princípios de conservação de massa e dinâmica de fluxos. De acordo com a lei de *Betz*, nenhuma turbina consegue extrair mais do que 16/27 (59,26%) da energia cinética do vento. Este factor é conhecido como o coeficiente de *Betz*.

O limite de *Betz* indica que, mesmo para os melhores aproveitamentos eólicos (turbinas de 2 ou 3 pás de eixo horizontal), recupera-se apenas um máximo de 59,26% da energia do vento, o que significa que, teoricamente, o coeficiente de potência ( $C_p$ ) máximo é 0,59. Para uma aplicação real, este coeficiente é da ordem de 0,3 a 0,4 no máximo.

O rendimento efectivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado pela equação 1:

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (1)$$

Define-se o coeficiente de potência ( $C_p$ ) de um rotor, através do balanço da potência disponível no eixo da turbina ( $P_{mec}$ ) e a potência disponível transportada pelo vento ( $P_{disp}$ ).

A figura 12 mostra que o coeficiente de potência ( $C_p$ ) pode ser utilizado para estimar a potência eléctrica de saída de um determinado aerogerador, em conjunto com a curva de densidade de potência dos ventos de uma dada região.

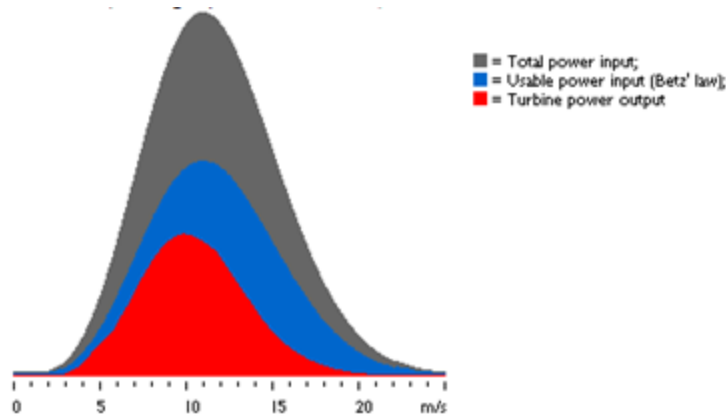


Figura 12 - Relação entre as densidades de potência: disponível no vento, captada por uma turbina eólica ideal (limite de Betz) e convertida em eléctrica por um determinado aerogerador real [25].

### 2.3.2. Potência eólica

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projectadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s [2].

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica baseia-se no aproveitamento da energia cinética ( $E_c$ ), associada ao movimento de uma dada massa de ar ( $m$ ), que se desloca a uma velocidade constante ( $v$ ). A energia cinética pode ser calculada através da equação 2.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

A massa de ar em movimento ao atravessar a secção plana transversal do rotor ( $A$ ) [ $m^2$ ] desloca uma massa ( $\rho \cdot A \cdot v$ ) [kg/s], em que  $\rho$  é a massa específica do ar.

A potência disponível no vento é, então, proporcional ao cubo da velocidade do vento.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot A \cdot v) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

A equação 3 revela que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento. Isto explica a importância da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas para garantir o sucesso económico dos projectos de energia eólica. A informação sobre o recurso eólico de um local,

independentemente das características das turbinas a instalar, pode ser apresentada em termos da densidade de potência disponível no vento [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], isto é, a potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina. A melhor forma de medir a velocidade do vento num local, é instalar anemómetros, à mesma altura que o cubo da turbina eólica a ser usado. Na figura 13 é apresentado o mapa de vento europeu.

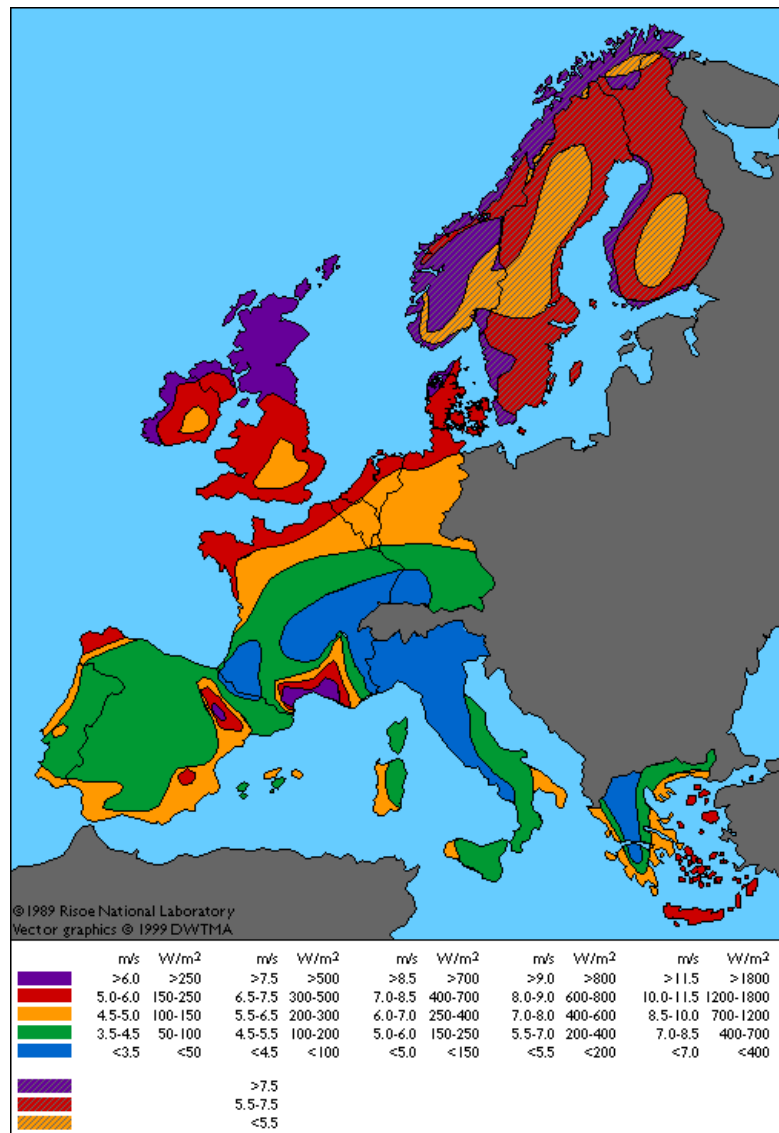


Figura 13 - *European wind atlas* [25].

As turbinas que melhor se adaptam à instalação são seleccionadas de acordo com o potencial local de instalação. A figura 14 ilustra a curva característica potência/velocidade do vento para uma turbina eólica da marca *Vestas* [9].

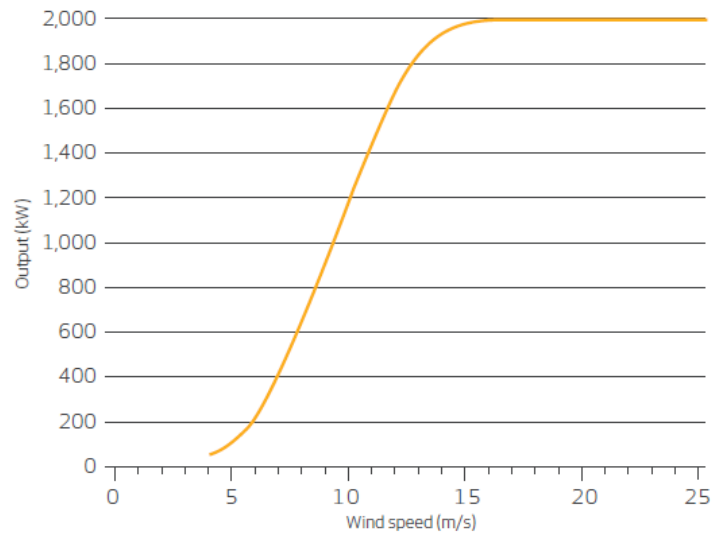


Figura 14 - Curva característica potência/velocidade do vento para uma turbina V80 - 2.0MW [49].

A região de partida determina a velocidade mínima do vento necessária para a turbina iniciar o seu funcionamento - velocidade de “*cut-in*”. Normalmente, as turbinas eólicas são projectadas para operar a partir de velocidades do vento entre 3 e 5 m/s. A região de paragem programada determina a velocidade máxima de operação da turbina eólica - velocidade “*cut-out*”. Normalmente, as turbinas eólicas são projectadas para entrar em paragem programada a partir de velocidades do vento superiores a 25 m/s. A região de operação normal da turbina eólica encontra-se entre a região de partida e a região de paragem programada.

As turbinas eólicas comerciais são classificadas de acordo com a Norma IEC 61400-12 [48], que define as classes das turbinas de acordo com 3 parâmetros, a velocidade média do vento à altura da torre, as velocidades extremas (rajadas) do vento dos últimos 50 anos e a turbulência. A referida norma classifica os aerogeradores em 4 classes (I, II, III e IV) de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Classe dos aerogeradores [48].

Classe	I	II	III	IV
Velocidade média do vento à altura da torre [m/s]	10	8,5	7,5	6
Rajadas extremas nos últimos 50 anos [m/s]	70	59,5	52,5	42
Turbulência Classe A	18%			
Turbulência Classe B	16%			

## 2.4. Tipos de turbinas

O critério mais importante na classificação das turbinas é aquele que utiliza a orientação do eixo de rotação (do rotor) em relação ao solo.

Podem dividir-se em dois grupos:

- Eixo Horizontal (*HAWT - Horizontal Axis Wind Turbine*), em que o eixo de rotação é paralelo ao solo e alinhado com o caudal do vento;
- Eixo Vertical (*VAWT - Vertical Axis Wind Turbine*), em que o eixo de rotação é vertical em relação ao solo.

### 2.4.1. Turbina de eixo horizontal

O princípio de funcionamento das turbinas de eixo horizontal é o de proporcionar o escoamento do vento de forma paralela ao eixo de rotação das pás da turbina. São, actualmente, o tipo de turbinas mais utilizadas em operação comercial.

Os primeiros aerogeradores instalados em Portugal, no final da década de 80, estavam equipados com máquinas de indução de rotor em gaiola. Estes aerogeradores caracterizavam-se por possuírem uma velocidade de rotação praticamente constante (sendo as variações da velocidade de rotação contabilizadas pelo escorregamento) e por possuírem caixas de velocidade para adaptação da velocidade de rotação nominal da turbina (cerca de 38 rpm) à velocidade de sincronismo da máquina de indução (tipicamente 1500 rpm). O controlo de potência acima da velocidade nominal do vento pode ser conseguido tanto com recurso a turbinas do tipo *stall* como do tipo *pitch* [15].

No final da década de 90, foram instalados em Portugal os primeiros aerogeradores equipados com máquinas síncronas. Caracterizam-se pela ausência de caixa de velocidades, sendo a adaptação da frequência das grandezas eléctricas do gerador à frequência da rede, realizada através de um sistema de conversão corrente alternada / corrente contínua / corrente alternada (AC/DC/AC). O controlo de potência acima da velocidade nominal do vento é conseguido com recurso a turbinas do tipo *pitch* [15].

Na mesma altura, começaram a ser instalados em Portugal aerogeradores equipados com máquinas de indução de rotor bobinado ou máquinas de indução de dupla alimentação. Estes aerogeradores caracterizavam-se por possuírem caixa de engrenagens por forma a adaptar a velocidade da turbina à velocidade de rotação da máquina de indução. O controlo de potência acima da velocidade nominal do vento é conseguido com recurso a turbinas do tipo *pitch* [15].

Os três componentes principais de uma turbina eólica horizontal são: o rotor, a cabina e a torre.

### 2.4.1.1. Geradores de Indução - Aerogeradores com caixa de engrenagens

Esta configuração é usada nos aerogeradores equipados com máquinas de indução de rotor em gaiola ou nos aerogeradores equipados com máquinas de indução de dupla alimentação (máquina de indução de rotor bobinado). Geralmente são utilizados os geradores de indução de dupla alimentação.

A figura 15 mostra um aerogerador com caixa de engrenagens, do fabricante de turbinas, a *Vestas* [9].

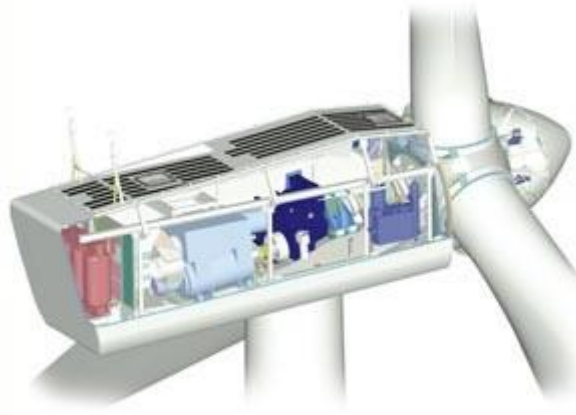


Figura 15 - Aerogerador com caixa de engrenagens *Vestas* [9].

#### **Rotor**

O rotor é constituído pelas pás, cubo do rotor e sistema de controlo de passo das pás (*pitch system*). As pás do rotor captam a energia cinética existente no vento, transferindo-a para o cubo do rotor. O cubo do rotor liga as pás ao veio de baixa velocidade da turbina eólica. O sistema de controlo de passo (*pitch system*) integra o mecanismo de controlo de potência das turbinas eólicas, permitindo alterar o ângulo de ataque das pás do rotor, ajustando aerodinamicamente o regime de funcionamento da turbina de modo a regular o nível de energia eólica captada.

### **Cabina**

Na cabina ou *nacelle* estão alojados os componentes do aerogerador, nomeadamente a caixa de engrenagens, o gerador, os veios de baixa e alta velocidade, o travão de disco e o mecanismo de orientação direccional (*yaw mechanism*).

Estes aerogeradores caracterizam-se por possuírem caixa de engrenagens. Este componente é utilizado para adequar a velocidade rotacional das pás à velocidade de rotação do gerador.

O veio de baixa velocidade liga o cubo do rotor a caixa de engrenagens e o veio de alta velocidade acciona o gerador eléctrico, podendo ser equipado com um travão de disco. O travão de disco é um equipamento de segurança utilizado em situações de emergência, por exemplo, fazer parar o rotor quando a velocidade do vento não se encontra dentro dos limites de operação. O mecanismo de orientação direccional (*yaw mechanism*) utiliza motores eléctricos para orientar a cabina, o qual, face à informação recebida por um sensor de direcção do vento, roda a cabina de modo a que o rotor fique alinhado com a direcção do vento.

### **Torre**

A torre suporta a cabina e o rotor. Como a velocidade do vento cresce à medida que se afasta do solo, tornando-se menos turbulento, é vantajoso ter uma torre alta, de forma a tirar-se o melhor partido das condições do vento. Podem ser tubulares ou reticuladas.

#### **2.4.1.2. Geradores Síncronos - Aerogeradores sem caixa de engrenagens**

Esta configuração é usada nos aerogeradores equipados com máquinas síncronas.

A figura 16 mostra um aerogerador sem caixa de engrenagens, do fabricante de turbinas *Enercon* [8].



Figura 16 - Aerogerador sem caixa de engrenagens Enercon [8].

### **Rotor**

Tal como na configuração anterior, o rotor é constituído pelas pás, cubo do rotor e sistema de controlo de passo das pás (*pitch system*).

### **Cabina**

Na cabina residem as maiores diferenças em relação à configuração A.

Estes aerogeradores caracterizavam-se pela ausência de caixa de engrenagens. O cubo do rotor encontra-se directamente ligado ao rotor do gerador síncrono. Os restantes componentes, nomeadamente o travão de disco e o mecanismo de orientação direccional (*yaw mechanism*) são similares à configuração anterior.

### **Torre**

Tal como na configuração anterior, a torre suporta a cabina e o rotor.

Uma das grandes vantagens das turbinas de eixo horizontal em relação às turbinas de eixo vertical é terem arranque automático, não precisando da presença física do homem, e com isto, poderem ser colocadas em regiões muito remotas, onde a turbina vai estar sujeita a ventos mais regulares, elevando a eficiência do sistema eólico. Por fim, o constante desenvolvimento e a maturidade revelada por esta tecnologia. Existem algumas desvantagens no seu uso. O seu funcionamento, se junto ao solo, onde o vento é turbulento, diminui a sua eficácia. O transporte e instalação dos vários constituintes podem ser difíceis. Finalmente o impacto visual que gera uma instalação deste tipo.

### 2.4.2. Turbina de eixo vertical

O princípio de funcionamento das turbinas de eixo vertical é o de proporcionar a passagem do vento segundo uma direcção perpendicular ao eixo de rotação de rotação do rotor (pás da turbina). Existem de três tipos: *Darrieus*, *Savonius* e *Giromill*. Apenas a primeira, tipo *Darrieus* (Figura 17), foi fabricada comercialmente.

As vantagens deste tipo de turbinas é a simplicidade de concepção, oferecem uma manutenção mais acessível pois a maioria dos elementos desta turbina encontram-se junto ao solo (equipamento de conversão da energia mecânica) e é indiferente à direcção do vento, logo não necessita de mecanismos de orientação direccional. Tem como desvantagens, a incapacidade de auto-arranque, necessitando de meios exteriores de auxílio. A maioria das turbinas de eixo vertical produz energia com uma baixa eficiência quando comparadas com as turbinas de eixo horizontal, devido ao facto dos ventos que circulam próximo do solo serem mais lentos e menos regulares.



Figura 17 - Turbina de eixo vertical do tipo *Darrieus* [25].

### 2.5. Caixa de engrenagens

A caixa de engrenagens é um invólucro fechado, contendo no seu interior um conjunto de engrenagens. Estão disponíveis numa ampla gama de tamanhos, capacidades e relações de velocidade.

A caixa de engrenagens, quando existe, está alojada na cabina, entre o rotor e o gerador eléctrico. Grande parte dos fabricantes de turbinas eólicas usa caixa de engrenagens. A sua função principal é adequar a velocidade rotacional das pás à velocidade de rotação do gerador.

Os tipos de engrenagens mais frequentes, usados em turbinas eólicas, podem ser identificados e classificados, de acordo com a sua concepção geométrica:

- Engrenagem de dentes retos (*Straight Gears*): têm rodas dentadas cilíndricas com dentes paralelos aos eixos;
- Engrenagem helicoidal (*Helical Gears*): os dentes estão em hélice, isto é, alinhados segundo um ângulo com o eixo do veio;
- Engrenagem helicoidal dupla (*Double Helical Gears*): têm dois conjuntos de dentes helicoidais em cada uma das rodas.

A figura 18 mostra as diversas configurações.



Figura 18 - Engrenagem de dentes retos, engrenagem helicoidal e helicoidal dupla [37].

Estas engrenagens simples podem ser combinadas de forma a criar novas configurações, dependendo do tipo de aplicação a que se destinam. Para aplicações em turbinas eólicas, as combinações mais usadas são as representadas na figura 19, a configuração planetária e a configuração paralela.



Figura 19 - Caixa de engrenagens paralela e planetárias [38].

Existem vários tipos de caixas de engrenagens, no entanto, são as caixas de engrenagens planetárias as mais usuais para aplicações em turbinas eólicas. Apesar de mais complexas, possuem algumas vantagens em termos de dimensão e peso [36].

Este tipo de caixa de engrenagens é composto por uma engrenagem central e várias engrenagens em volta, normalmente três. A figura 20 mostra uma caixa de engrenagens desse tipo [39].

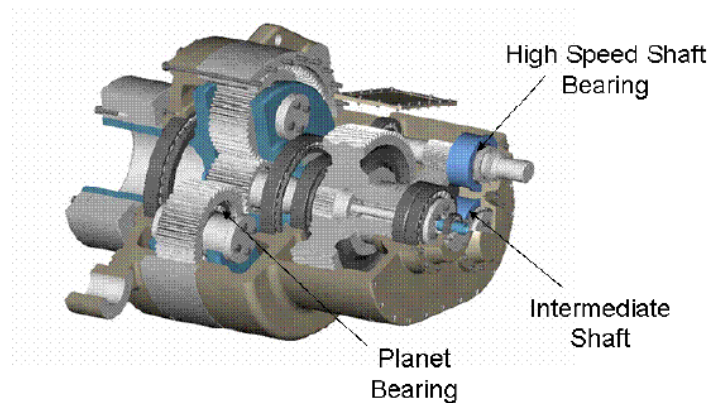


Figura 20 - Caixa de engrenagens planetária [39].

A engrenagem central roda à velocidade imposta pelas pás do aerogerador, enquanto as três engrenagens mais pequenas fazem o aumento da velocidade. O eixo associado ao nível de velocidade mais elevado é o que vai estar acoplado ao gerador eléctrico [36].

## 2.6. Geradores eléctricos

Os aerogeradores são os equipamentos que convertem a energia cinética contida nos ventos em energia eléctrica. Na verdade, a energia cinética do ar em movimento, fornece energia mecânica a uma hélice, que através de um sistema de transmissão mecânica, faz rodar o rotor de um gerador, que converte a energia mecânica de rotação em energia eléctrica.

Para converter a energia mecânica disponível no eixo do rotor, podem usar-se máquinas eléctricas de dois tipos. São as seguintes:

- Máquina de Corrente Contínua ou DC;
- Máquina de Corrente Alternada:
  - Máquina Síncrona;
  - Máquina de Indução ou Assíncrona.

O funcionamento deste tipo de máquinas baseia-se no princípio da indução electromagnética, ou seja, quando um condutor se move no seio de um campo magnético, é induzida uma f.e.m. no condutor, Lei de Faraday. Assim, quando a estrutura girante (rotor) é rodada a uma determinada velocidade, uma f.e.m. vai ser induzida nos condutores que giram na estrutura do rotor. Se uma carga eléctrica for ligada a estes condutores, fluirá uma corrente através da carga, e portanto, uma potência eléctrica à carga. Podem funcionar como geradores ou motores. Quando a máquina transforma energia mecânica em energia eléctrica é um gerador. Quando a máquina transforma energia eléctrica em energia mecânica é um motor. Este tipo de máquinas é constituído por duas partes principais: Uma parte fixa, o estator, e uma parte móvel, designada por rotor. Entre o estator e o rotor encontra-se uma parte de ar que os separa: o entreferro. Estes núcleos, estator e rotor, são de material ferromagnético de alta permeabilidade.

Estes geradores podem funcionar como sistemas de velocidade variável ou como sistemas de velocidade fixa.

### 2.6.1. Máquina de Corrente Contínua ou DC

Internamente, todas as máquinas eléctricas rotativas são máquinas de corrente alternada. Quando se roda o rotor a uma determinada velocidade, uma f.e.m. vai ser induzida nos condutores que giram na sua estrutura (rotor). A máquina DC deve converter a corrente alternada que produz em corrente contínua. Para isso, usa um comutador mecânico. Este comutador é constituído por uma série de segmentos de cobre (sistema de colector), de forma a fechar o circuito entre cada uma das bobinas do enrolamento do rotor e as escovas. É montado no eixo da máquina e gira

juntamente com o mesmo. O movimento de rotação do eixo produz a comutação entre os circuitos dos enrolamentos. As escovas são peças fixas, de carvão, responsáveis por conduzir a energia do circuito do rotor para a carga eléctrica. Estes contactos deslizantes resultam na baixa fiabilidade do sistema e no alto custo de manutenção. Apesar disso, as máquinas de corrente contínua foram muito utilizadas até à década 80, devido ao controlo fácil da sua velocidade. São usadas num reduzido número de instalações, de pequena capacidade e quando a corrente contínua pode ser usada localmente.

As máquinas de corrente contínua são classificadas de acordo com o tipo de alimentação às suas bobinas. Estamos na presença de máquinas de excitação independente, quando existe uma fonte de corrente contínua que alimenta o circuito indutor e outra distinta que alimenta o circuito induzido. Na presença de máquinas auto-excitadas, quando o circuito indutor e o circuito induzido, constituído por bobinas em série ou paralelo, são percorridos pela mesma fonte corrente contínua, produzindo o campo magnético necessário ao funcionamento da máquina. Actualmente a máquina de DC é frequentemente concebida com ímanes permanentes para eliminar a necessidade do sistema de colectores e escovas da máquina convencional. No rotor ficam alojados os ímanes permanentes e a bobinagem do induzido na armadura, ou estator. A corrente que vai circular no estator será alternada, sendo depois rectificada por conversores de estado sólido. Estas máquinas não precisam do anel colector nem das escovas, portanto, a fiabilidade é muito melhorada. A máquina DC de ímanes permanentes é usada com turbinas eólicas de pequeno porte, devido à limitação da capacidade magnética dos ímanes permanentes. A máquina DC sem escovas tem uma utilização limitada a potências inferiores a 100 kW [51].

## **2.6.2. Máquina de Corrente Alternada**

### **2.6.2.1. Máquina Síncrona**

A maior parte da energia eléctrica consumida no mundo é produzida pelo gerador síncrono de corrente alternada. Por esta razão, a máquina síncrona é uma máquina muito utilizada. A máquina síncrona funciona a uma velocidade constante relacionada com a frequência. Por isso, não é adequada para operação em parques eólicos de velocidade variável. Além disso, a máquina síncrona necessita de corrente contínua para excitar o campo indutor (rotor), necessitando do anel colector e escovas sobre o eixo do rotor. Isto representa uma limitação no seu uso. A necessidade de excitação em corrente contínua e das escovas podem ser eliminadas pelo binário de relutância. A fiabilidade é melhorada, reduzindo o custo. A utilização da máquina, no entanto, é

limitada a dezenas de kW. Presentemente, o gerador de relutância síncrono é utilizado para geradores eólicos de pequena potência [51].

A figura 21 ilustra o esquema de ligações dos geradores eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável.

Nestes sistemas, a máquina síncrona encontra-se ligada à rede através de um sistema de conversão AC/DC/AC, já que a frequência da tensão e corrente no estator é diferente da frequência da rede eléctrica.

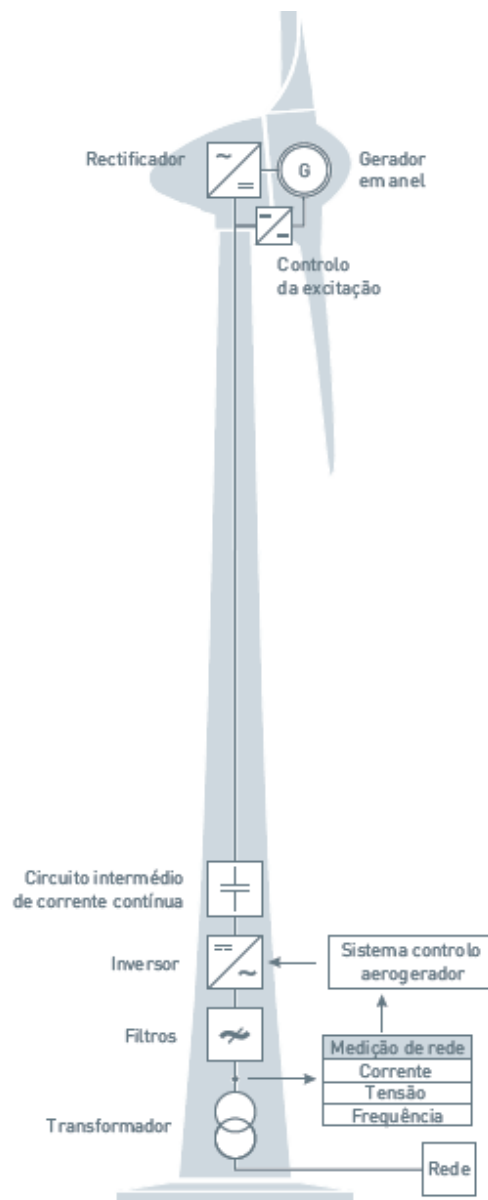


Figura 21 - Esquema de ligações dos geradores eólicos equipados com máquinas síncronas de velocidade variável da Enercon [8].

Os geradores eólicos deste tipo não possuem caixa de engrenagens, pelo que a velocidade mecânica de rotação do rotor é idêntica à velocidade de rotação da turbina. Tipicamente a velocidade de rotação da turbina (e do rotor da máquina síncrona) varia entre 17 rpm e 36 rpm, pelo que a máquina possui um número de pares de pólos elevado.

O estator da máquina síncrona tem seis fases e encontra-se ligado a dois sistemas de conversão AC/DC/AC independentes. O paralelo entre os dois sistemas de conversão é efectuado à saída dos conversores DC/AC (conversores de rede) que se encontram ligados ao transformador elevador.

Cada um dos conversores AC/DC ligados ao gerador (conversores de gerador) é constituído por um conversor em ponte paralelo duplo equipado com 6 tirístores. Estes tirístores funcionam com um ângulo de disparo constante.

A tensão contínua aos terminais do condensador, colocado em paralelo com os conversores, deve ser regulada para um valor constante. Para valores baixos da velocidade do rotor, o sistema de excitação da máquina síncrona não tem capacidade para assegurar aquele valor, sendo necessário recorrer a um “*chopper*” (conversor DC/DC), instalado entre o gerador e o condensador, o qual é desligado quando a velocidade do rotor excede um determinado valor.

O conversor de rede é um conversor em ponte paralelo duplo equipado com IGBTs, com um sistema de comando por modulação da largura do impulso (PWM). Este conversor controla a potência activa injectada na rede e o factor de potência. O controlo de potência activa no conversor de rede permite a imposição de um binário electromagnético (resistente) ao gerador, tornando assim possível o controlo da velocidade de rotação do grupo turbina eólica - gerador, por forma a obter a velocidade específica óptima da ponta da pá, para cada valor da velocidade de vento.

A figura 22 ilustra a potência activa e reactiva fornecida pelo conversor de rede de um gerador eólico deste tipo em função da velocidade de rotação do rotor.

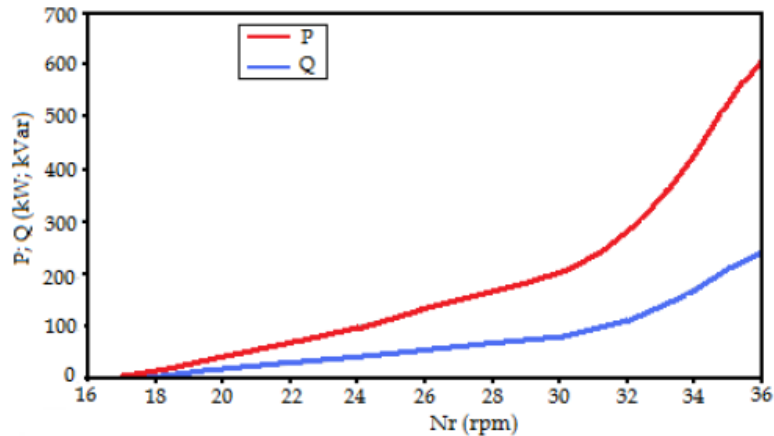


Figura 22 - Potência activa e reactiva fornecida por um gerador de energia eólica equipado com gerador síncrono funcionando a velocidade variável [50].

Ao contrário da máquina de indução, a máquina síncrona, quando utilizada no sistema de ligação à rede, tem algumas vantagens. Não requer a potência reactiva da rede, melhorando a qualidade de energia no interface com rede. Esta vantagem é mais pronunciada quando o parque eólico está ligado a uma rede de pequena capacidade, de alta e baixa tensão. Actualmente, as centrais eólicas geralmente encontram-se ligadas a redes de grande potência, usando linhas de menor distância e, na maioria dos casos, utilizam o gerador de indução [51].

### 2.6.2.2. Máquina de Indução ou Assíncrona

As máquinas de indução consomem a maior parte da energia eléctrica na indústria. São, por esta razão, uma tecnologia bem desenvolvida. A principal vantagem da máquina de indução é a sua construção sólida, sem necessidade de sistema de colectores e escovas e sem excitação independente em corrente contínua. As desvantagens das máquinas DC e máquinas síncronas são eliminadas na máquina de indução, resultando no baixo custo, manutenção reduzida e num melhor desempenho em regime transitório. Por estas razões, o gerador de indução é amplamente utilizado em parques eólicos e em pequenas centrais hidreléctricas. A máquina de indução está disponível para vários níveis de potência.

A máquina de indução necessita de excitação em corrente alternada. A máquina pode ser auto-excitada ou excitada externamente. Uma vez que a corrente de excitação é reactiva, uma máquina isolada é auto-excitada por condensadores colocados em paralelo. O gerador de indução ligado à rede é excitado a partir desta. Os geradores síncronos, em paralelo com a rede devem ser capazes de fornecer essa energia reactiva, necessária para a excitação das máquinas de indução.

Por razões económicas e fiabilidade, muitos sistemas de energia eólicos usam como gerador eléctrico as máquinas de indução [51].

Os geradores de indução podem ser de dois tipos:

- Máquina de Indução com o Rotor em Gaiola;
- Máquina de Indução Duplamente Alimentada (com Rotor bobinado).

### 2.6.2.2.1. Máquina de Indução com o Rotor em Gaiola

A máquina de indução com o rotor em gaiola funciona como gerador nas situações em que a velocidade angular do rotor é superior à velocidade angular do campo girante, ou seja, para deslizamentos,  $s$ , negativos, conforme ilustrado na figura 23.

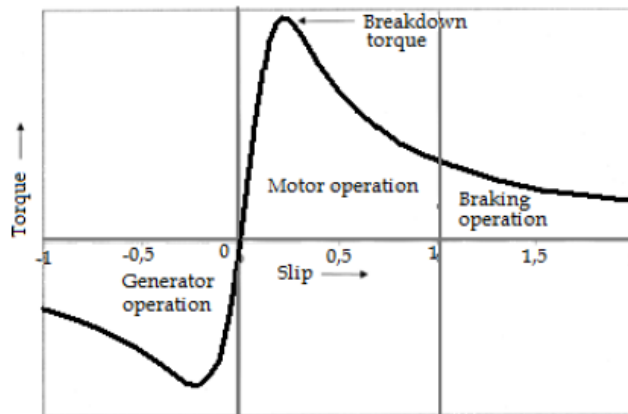


Figura 23 - Característica binária versus velocidade da máquina de indução em três modos de funcionamento [50].

No modo de funcionamento como gerador, a máquina funciona entre os pontos correspondentes ao deslizamento (aproximadamente) nulo e o correspondente ao valor máximo da intensidade de corrente admissível no estator, o qual, para a máquina a que corresponde a característica representada na figura 23, se verifica para um valor de  $s$  igual a  $-0,8\%$ . Em virtude da variação da velocidade admissível da máquina em relação à velocidade de sincronismo ser muito pequena, na prática, esta máquina comporta-se como tendo velocidade constante.

Na máquina de indução com o rotor em gaiola, o campo electromagnético, essencial para a conversão de energia mecânica em energia eléctrica, é estabelecido através do estator da máquina. Tal facto implica que a máquina absorve sempre potência reactiva da rede.

Os geradores eólicos equipados com máquinas de indução com o rotor em gaiola são sempre equipados com baterias de condensadores por forma a compensar o factor de potência das máquinas. Os fabricantes compensam, geralmente, o factor de potência para o valor unitário, por meio de bancos de condensadores.

### 2.6.2.2.2. Máquina de Indução Duplamente Alimentada (Rotor Bobinado)

O princípio de funcionamento da máquina de indução duplamente alimentada baseia-se na possibilidade de controlar a sua velocidade por variação da resistência do rotor. A figura 24 ilustra a variação das curvas de binário/deslizamento da máquina de indução devido à variação de uma resistência ligada em série com a do enrolamento do rotor.

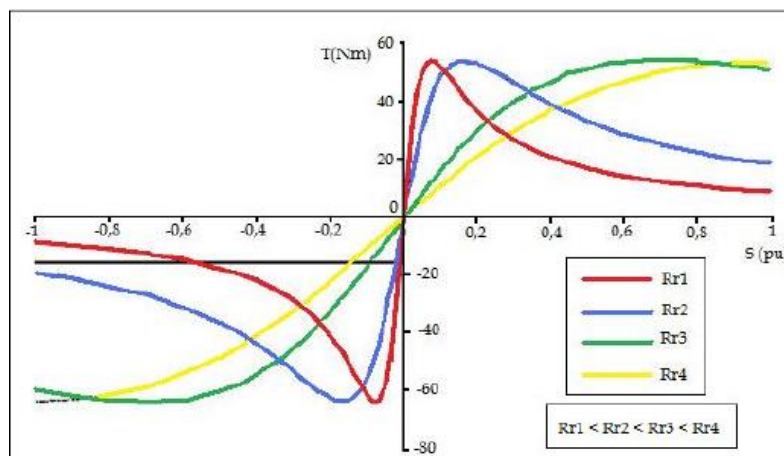


Figura 24 - Curvas características binário-velocidade para diferentes valores da resistência do rotor [50].

Como se apresenta na figura 24, para um determinado binário mecânico  $T$ , pode-se variar a velocidade da máquina de indução pela variação da resistência do rotor. Se, em lugar de uma resistência variável, se instalar um sistema de conversão electrónico AC/DC/AC ligado ao rotor, é possível extrair a potência activa pelo rotor da máquina e, assim, controlar a velocidade. É o método de obter energia da máquina de indução pelo enrolamento do rotor.

No modo de funcionamento do gerador de indução duplamente alimentado com base no princípio descrito, com deslizamento negativo até se atingir a intensidade de corrente nominal da máquina, a potência extraída pelo rotor é controlada de forma a otimizar a velocidade especificada para o tipo de lâmina do rotor e, assim, maximizar o valor do coeficiente de potência da turbina.

Para deslizamentos negativos, o valor mais elevado (em módulo) para o qual a intensidade da corrente do estator atinge o valor nominal, as potências activa no estator e rotor permanecem constantes (linha a preto da figura 24).

Este princípio de controlo de velocidade através do uso da energia de deslizamento significa que esta máquina pode funcionar como gerador com deslizamento positivo. Para garantir este modo de funcionamento, é necessário fornecer potência activa ao rotor.

As ligações da máquina de indução duplamente alimentada são apresentadas na figura 25.

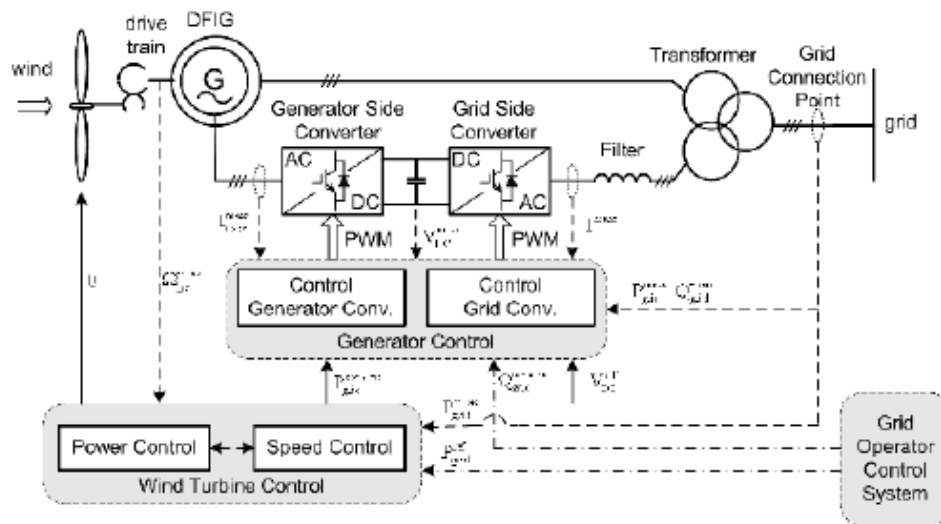


Figura 25 - Esquema de ligações da máquina de indução duplamente alimentada [15].

O estator da máquina de indução está directamente ligado à rede de energia eléctrica. O rotor é ligado à rede através de um sistema electrónico de conversão AC/DC/AC e um transformador elevador.

Os conversores AC/DC/AC que interligam o rotor da máquina à rede, através do transformador elevador, são conversores tipo ponte-PD3 a seis impulsos equipados com transístores bipolares porta isolada (IGBTs), controlados por modulação de largura de impulso.

Normalmente, na máquina de indução duplamente alimentada, o conversor ligado ao transformador elevador controla a tensão nos terminais do condensador e controla o factor de potência no ponto comum para os circuitos do rotor e do estator. O

conversor ligado directamente ao rotor do motor de indução controla o módulo e o argumento da intensidade da corrente injectada ou extraída através do rotor.

O princípio de funcionamento do sistema de controlo por modulação de largura de impulso pode impor uma forma de onda aproximadamente sinusoidal, com frequência, amplitude e fase ajustável aos terminais AC dos conversores. Esta propriedade do sistema de controlo por modulação de largura de impulso permite dispensar a utilização de baterias de condensadores na grande maioria dos casos. Tipicamente, os fabricantes asseguram um controlo do factor de potência entre cerca de 0,9 indutivo e cerca de 0,9 capacitivo aos terminais da máquina.

O objectivo do sistema de controlo dos conversores electrónicos AC/DC/AC é garantir a maximização do coeficiente de potência da turbina, principalmente na região característica da potência em função do vento e onde a potência não é controlada. Além disso, os sistemas de controlo dos conversores permitem manter um determinado valor do factor de potência no ponto de interligação da máquina de indução duplamente alimentada com a rede de energia eléctrica. Na região característica em que a potência da turbina é controlada, o sistema de controlo dos conversores AC/DC/AC mantém constante a potência total, extraída pelo estator e rotor da máquina, complementada pelo sistema de controlo do ângulo de passo das pás do rotor. Pode-se portanto concluir que o sistema de controlo dos geradores eólicos, do tipo máquinas de indução duplamente alimentadas, pode maximizar a energia eléctrica entregue à rede numa ampla gama de variação da velocidade do vento.



### **3. AVARIAS NOS AEROGERADORES**



### 3.1. Manutenção nos aerogeradores

Os primeiros esquemas de manutenção aplicados aos sistemas eólicos eram baseados em técnicas correctivas, isto é, as turbinas eólicas manter-se-iam em operação até que ocorresse uma avaria. À medida que as máquinas foram crescendo em termos de potência, preço e complexidade, esta estratégia deixou de fazer sentido, sendo implantadas inspecções periódicas com vista a aferir o estado de funcionamento das máquinas. A abordagem actual prevê a reparação ou substituição das peças com base no seu estado actual e no histórico de funcionamento da máquina, em vez de uma manutenção baseada nas condições médias de funcionamento previstas da máquina [19].

Segundo a norma NP EN 13306:2007 [21], pode-se definir manutenção como “A combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida.”

As acções de manutenção podem ser, essencialmente, de duas naturezas; manutenção correctiva e manutenção preventiva. O esquema representado na figura 26 apresenta a classificação dos tipos de manutenção.

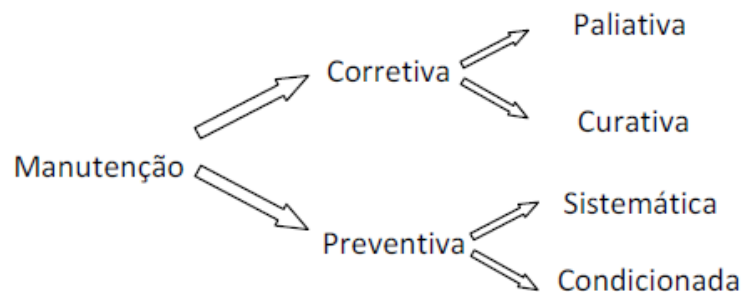


Figura 26 - Classificação da manutenção [22].

De acordo com a norma NP EN 13306:2007 [21], pode-se definir manutenção correctiva como “A manutenção efectuada depois de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida.”

De acordo com a norma NP EN 13306:2007 [21], pode-se definir manutenção preventiva como “A manutenção efectuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem.” A manutenção preventiva é dividida em dois ramos:

- Manutenção preventiva sistemática: é a manutenção preventiva executada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de funcionamento, sem controlo prévio do estado do bem.
- Manutenção preventiva condicionada: é a manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem, para a determinação do seu estado ou condição, e integrando as intervenções daí decorrentes.

A tabela 2 mostra as vantagens e desvantagens encontradas nos diferentes métodos de manutenção aplicados às turbinas eólicas [23].

Tabela 2 – Comparação de métodos de manutenção [23].

Método	Vantagens	Desvantagens
<b>Manutenção Correctiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixos custos de manutenção durante a operação;</li> <li>- Componentes serão usados o tempo máximo de vida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto risco de danos consequentes, resultantes de excessivos tempos de paragem;</li> <li>- Não é possível uma manutenção planeada;</li> <li>- A logística das peças sobresselentes é complicada;</li> <li>- A reposição de peças sobresselentes é provavelmente longa.</li> </ul>
<b>Manutenção Preventiva Sistemática</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É expectável um baixo tempo de paragem;</li> <li>- A manutenção pode ser planeada;</li> <li>- A logística de peças sobresselentes é fácil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os componentes não serão usados até ao seu tempo máximo de vida;</li> <li>- Os custos de manutenção são mais elevados quando comparados com a manutenção correctiva.</li> </ul>
<b>Manutenção Preventiva Condicionada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os componentes serão usados quase até ao seu tempo de vida;</li> <li>- É expectável um tempo de paragem reduzido;</li> <li>- A manutenção pode ser planeada;</li> <li>- A logística das peças sobresselentes é fácil, dado que as anomalias podem ser detectadas antecipadamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É requerida informação fiável sobre o tempo de vida restante dos componentes;</li> <li>- É requerido um elevado esforço computacional (<i>hardware</i> e <i>software</i>) de monitorização;</li> <li>- Custo de outra camada no sistema;</li> <li>- O mercado de monitorização para sistemas eólicos não é maduro;</li> <li>- É difícil a identificação das condições de limite adequadas.</li> </ul>

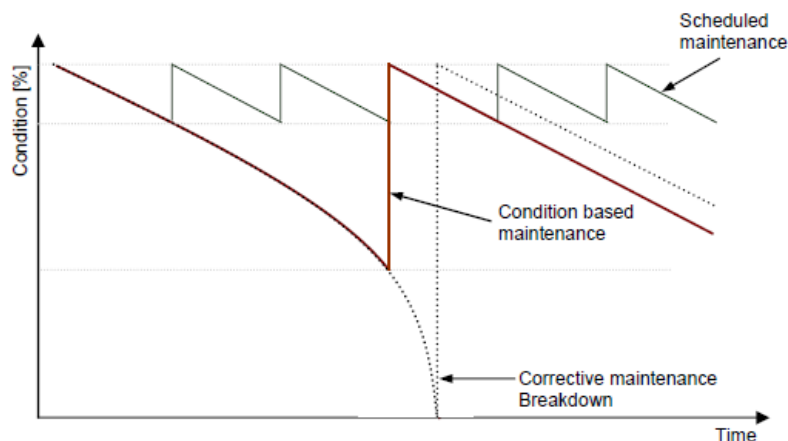
O objectivo das acções de manutenção preventiva é o de reduzir as acções de manutenção correctiva a um nível mínimo.

As acções de manutenção preventiva são planeadas de forma a incluir verificações de rotina e testes aos equipamentos. Estes serviços de manutenção são normalmente bianuais. Compreendem um grande número de verificações, de modo a avaliar o estado operacional de cada turbina e actualizar os seus registos de manutenção. São postas em prática com o auxílio de uma lista de verificação ou *checklists*, e incluem actividades como: verificação à caixa de engrenagens e aos níveis de óleo do sistema

hidráulico, inspecção de fugas de óleo, inspecção dos cabos que descem pela torre e dos seus sistemas de suporte, observação da turbina em operação, com o fim de verificar a ausência de vibrações anormais, do sistema de transmissão e inspecção do disco do travão. Poderá incluir outras actividades como a verificação das diversas ligações entre componentes, tais como: a ligação das pás, a ligação da caixa de engrenagens à *nacelle*, as ligações aparafusadas na base da torre, o desempenho do sistema de *yaw*, a solidez da ligação dos cabos, a aferição da calibração do sistema de *pitch* e filtros de óleo.

As acções de manutenção correctiva nas turbinas eólicas constituem uma resposta para falhas nos equipamentos devido a erros humanos, fenómenos atmosféricos, falhas de concepção ou falhas dos componentes. O conhecimento da necessidade destas acções ocorre durante as inspecções de rotina ou, quando o sistema de controlo retira a turbina de operação perante uma falha incipiente.

Na figura 27 está representada a comparação entre os vários tipos de manutenção possíveis [23].



**Figura 27 - Comparação entre os três tipos de manutenção (Correctiva, Preventiva Sistemática e Preventiva Condicionada) no tempo [23].**

As estratégias de manutenção dos aerogeradores são definidas pelos fabricantes dos mesmos quando asseguram a manutenção. Normalmente, as mesmas estratégias são seguidas pelos operadores dos parques eólicos quando são eles próprios responsáveis pela manutenção. Estas estratégias têm como objectivo maximizar a disponibilidade das máquinas e minimizar os encargos decorrentes da manutenção.

Actualmente a manutenção dos aerogeradores é essencialmente baseada no tempo. Existem fabricantes que optam por acções de manutenção bianuais e outros que optam por acções de manutenção trimestrais. Os que optam por acções de

manutenção bianuais, tais como, a *Vestas*, a *Gamesa* ou a *Alston*, executam-nas da seguinte forma: uma das manutenções, mais rápida, designada por *minor maintenance*, executada por duas pessoas durante quatro horas e uma mais aprofundada, designada por *major maintenance*, executada por duas pessoas durante sete horas [26]. Estas acções de manutenção são normalmente efectuadas pelas mesmas equipas, especializadas nos diferentes elementos constituintes do aerogerador, tais como, os sistemas eléctricos/electrónicos e os sistemas mecânicos. Os fabricantes que optam por acções de manutenção trimestrais, como a *Enercon*, executam-na da seguinte forma: de três em três meses é feita uma verificação a um sistema diferente do aerogerador. Existe uma inspecção baseada na verificação visual aos sistemas, passados três meses é feita manutenção para efeitos de lubrificação nos sistemas de desgaste, três meses depois é feita a manutenção dos sistemas eléctricos e por último é feita a manutenção dos sistemas mecânicos. Tem ainda a particularidade de serem efectuadas por equipas de manutenção específicas para o tipo de manutenção a executar [16], representada na figura 28.

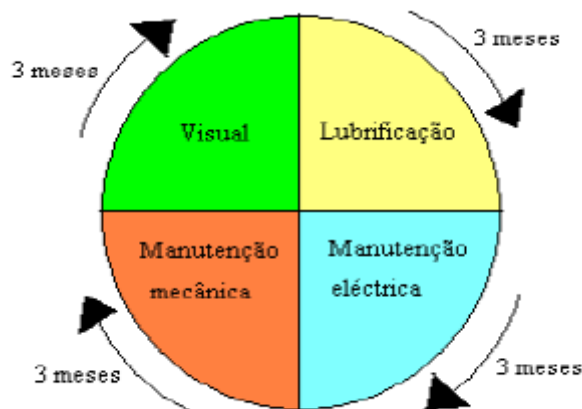


Figura 28 - Descrição dos intervalos de manutenção *Enercon* [16].

Como referido anteriormente, os fabricantes dos aerogeradores e os operadores dos parques eólicos executam a manutenção dos aerogeradores baseados no tempo. No entanto, começaram a desenvolver estratégias baseadas no estado dos equipamentos, de forma a otimizar a manutenção. Num parque eólico, os diversos aerogeradores estão sujeitos a regimes de carga diferentes logo, os componentes constituintes do aerogerador deverão ter um desgaste diferente de máquina para máquina. A principal finalidade da optimização da manutenção é determinar a estratégia de manutenção que forneça o melhor equilíbrio entre custos de manutenção e as consequências da não realização das acções.

### 3.2. Avarias mais importantes nos aerogeradores

A utilização de recursos energéticos renováveis é encarada como vital para se alcançar um desenvolvimento sustentável. A energia eólica apresenta-se como uma das mais sustentáveis e, por isso, tem evoluído de uma forma exponencial nos últimos anos. Apesar da sua maturidade, esta tecnologia apresenta alguns problemas e desafios. A experiência adquirida nos últimos trinta anos aliada ao esforço para melhorar a fiabilidade operacional das turbinas não tem conseguido solucionar a elevada taxa de falhas em alguns componentes. Todos os componentes são sujeitos a amplos testes de fabrico de forma a garantir uma qualidade elevada, no entanto, o rápido aumento da potência das turbinas e a necessidade de fornecer o mercado com esta tecnologia não terá dado o tempo necessário para o amadurecimento de alguns componentes.

Existem fundamentalmente três tipos de anomalias que podem ocorrer num aerogerador: eléctricas, electrónicas e mecânicas [27].

As falhas eléctricas ocorrem com alguma frequência, no entanto, são as mais inesperadas. Os equipamentos utilizados, máquinas eléctricas, são amplamente conhecidos e estudados [27].

As falhas electrónicas têm uma taxa de ocorrência superior à taxa de ocorrência das falhas eléctricas. Estão frequentemente relacionadas com sensores e cartas electrónicas. Estas falhas podem ser provocadas por efeito das descargas eléctricas atmosféricas ou outros fenómenos atmosféricos. Quando ocorrem este tipo de problemas, a solução passa por substituir o componente. Existe um grande número de sensores num aerogerador, dando informação por exemplo, do *yaw system*, do sistema hidráulico, da temperatura ambiente, da rotação, do gerador, do *pitch system*, etc. [27].

As falhas mecânicas estão associadas as falhas ocorridas nas caixas de engrenagens, nas pás e no sistema hidráulico. Fissuras nas caixas de engrenagens e estragos nas pás causadas por efeitos atmosféricos são os problemas mais usuais. Relativamente à caixa de engrenagens, o aumento do tamanho das torres e das pás permite a captação de ventos com velocidades mais elevadas e, conseqüentemente, as forças aplicadas às rodas dentadas são maiores, o que pode levar à rotura dos materiais. Quanto às pás, os estragos provocados pelas descargas eléctricas atmosféricas são os mais comuns. Referir ainda que este sistema sofre vibrações contínuas e forças centrífugas que acentuam a sua fragilidade.

Existem vários estudos efectuados em parques eólicos com o objectivo de se determinar as avarias mais frequentes e o tempo de paragem associado, provocado

por estas avarias. Estes estudos são baseados em registos de dados e relatórios elaborados pelas equipas de manutenção dos parques eólicos.

Um estudo levado a cabo por *J. Ribrant*, para os parques eólicos finlandeses [23], analisou os dados de mais de 60 turbinas, para o período compreendido entre 2000 a 2004. A taxa de avarias e os tempos de paragem estão representados na figura 29.

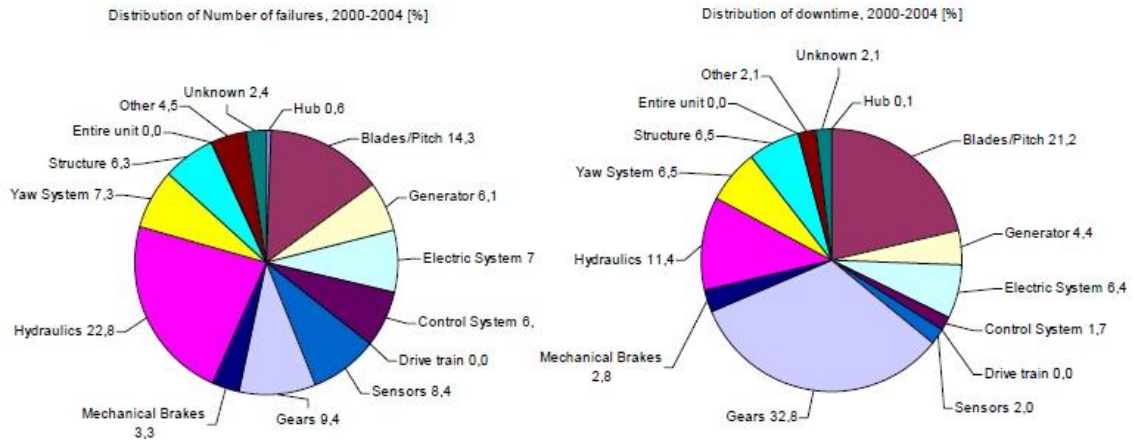


Figura 29 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques finlandeses [23].

O mesmo autor efectua um estudo para os parques eólicos suecos [23, 28], em que analisou os dados de mais de 500 turbinas, para o mesmo período de tempo. A taxa de avarias e os tempos de paragem estão representados na figura 30.

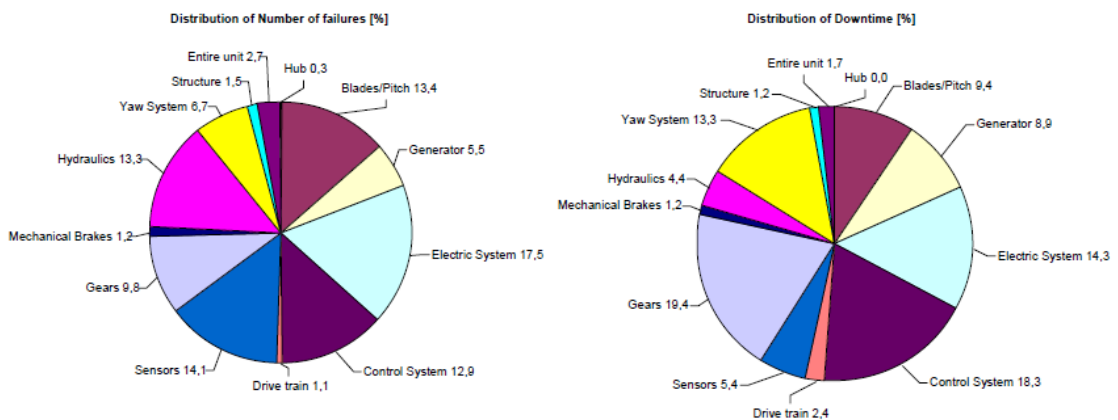


Figura 30 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques suecos [23, 28].

Na sua tese de doutoramento, *J. A. Andrawus*, apresenta o resultado do cálculo da taxa de avarias dos parques eólicos do Reino Unido e da Holanda [29], recorrendo a dados obtidos no *Centre for Renewable Energy Systems Technology* e no *Energy Research Centre of the Netherlands*. A figura 31 apresenta as referidas taxa de avarias nos parques eólicos dos dois países.

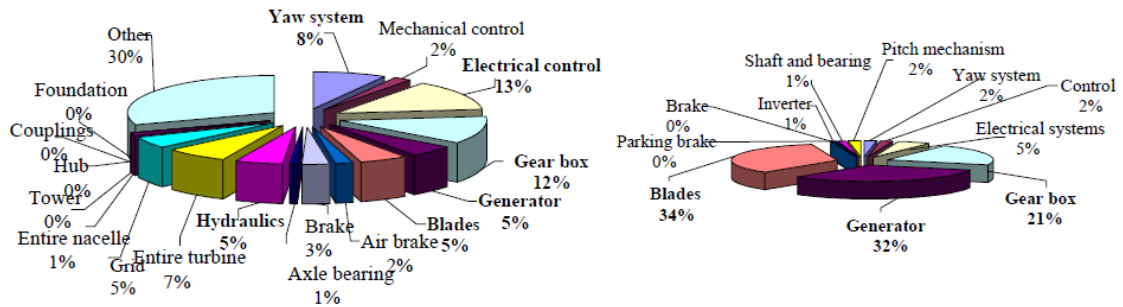


Figura 31 - Taxa de avarias no Reino Unido e Holanda [29].

Mais recentemente, num estudo levado a cabo pelo *ISET Fraunhofer - Institute for Wind Energy and Energy Systems Technology* [30, 31], foram analisados 193000 relatórios de operação mensais e 64000 relatórios de manutenção e reparação, feitos pelas equipas de manutenção em 1500 turbinas eólicas instaladas em parques na Alemanha, durante 10 anos. O objectivo foi determinar a influência das condições meteorológicas no funcionamento das turbinas eólicas. A taxa de avarias e o tempo de paragem associado estão representados na figura 32.

De acordo com o mesmo estudo, verifica-se que para alguns componentes a taxa de falhas tem vindo a decrescer com o tempo, por exemplo, o sistema de controlo, enquanto noutros, como o sistema eléctrico, acontece o contrário. A figura 33 apresenta o desenvolvimento da taxa de falhas durante o tempo de operação [31].

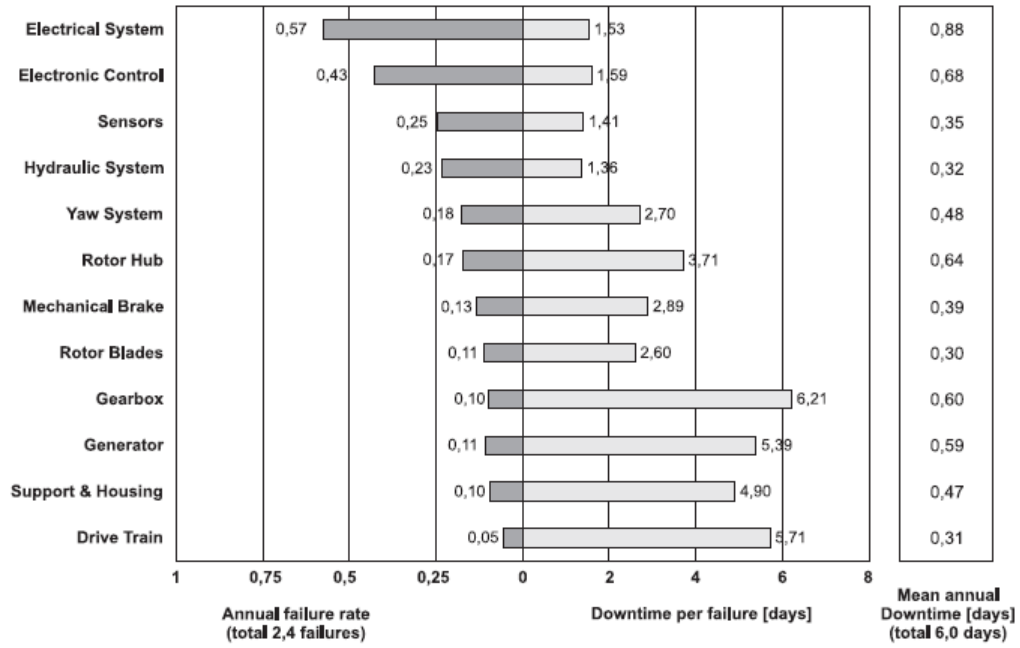


Figura 32 - Taxa de avarias e tempo de paragem dos parques alemães [31].

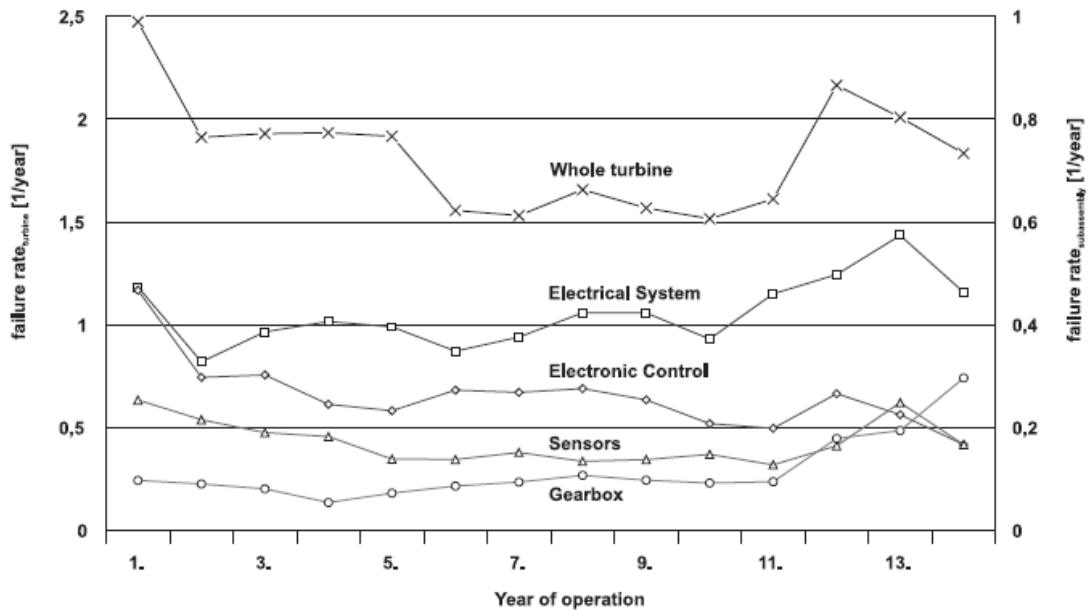


Figura 33 - Desenvolvimento da taxa de falhas durante o tempo de operação [31].

Como se verifica, existem diferenças nos tempos de paragem associados às diferentes falhas dos componentes dos aerogeradores. Enquanto alguns tipos de falhas provocam tempos de paragem muito curtos, outras levam a tempos de paragem mais longos.

De acordo com o estudo realizado por *Faulstich et al.* [31], é possível classificar as falhas, quanto ao tempo de paragem originado, em duas classes. Todas as falhas que originem tempos de paragem inferiores a um dia podem ser classificadas como falhas menores, enquanto todas as outras falhas são classificadas como maiores. Nos parques eólicos instalados *onshore*, as falhas menores representam 75% do total de falhas e são responsáveis por apenas 5% do tempo de paragem das turbinas, enquanto as falhas maiores, que representam 25% do total de falhas, são responsáveis pelos restantes 95% de tempo de paragem das turbinas. Para as instalações *offshore*, é expectável que as falhas tenham o mesmo comportamento, no entanto, o tempo de paragem associado é superior, devido às dificuldades de acesso aos equipamentos. A figura 34 representa a taxa de avarias e o tempo de paragem associado às falhas, conforme sejam consideradas menores ou maiores.

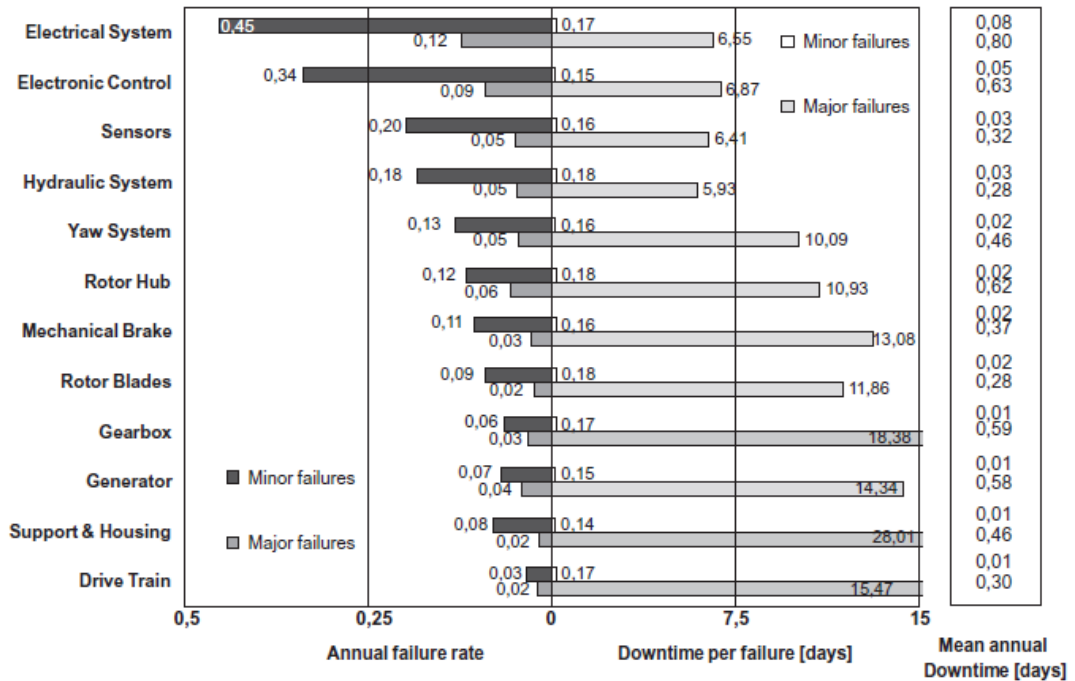


Figura 34 - Características das avarias e tempo de paragem dos parques alemães [31].

As pás, a caixa de engrenagens e o gerador eléctrico são os três componentes de uma turbina eólica que originam tempos de paragem mais prolongados. Os sistemas de monitorização de avarias devem prestar especial atenção a estes componentes.

### 3.2.1. Pás

Como comprovam os vários estudos referidos, em condições de operação normal, as pás, são equipamentos sujeitos a falhas. Estas falhas podem surgir em virtude dos esforços a que as mesmas estão sujeitas ou em consequência de fenómenos atmosféricos. A elevada altitude em que os parques eólicos estão instalados, pode levar a acumulação de gelo nas pás, provocando falhas nas mesmas. Outro aspecto que deve ser levado em conta é a acumulação de sujidade, como poeira ou insectos, que aumenta a aspereza da superfície das pás, provocando uma diminuição da potência devido à redução do desempenho aerodinâmico do perfil da pá.

São várias as forças cíclicas que actuam sobre as pás de uma turbina eólica, como:

- Aerodinâmica (criada pela sustentação e arrasto das pás);
- Gravitacional (provocada pela atracção da terra);
- Centrífuga (provocada pelo movimento rotacional das pás);
- Giroscópica (resultam do *yawing* durante a operação);
- Operacional (resultam do *pitching*, *yawing*, ligação ou desligamento do gerador).

Todas estas forças contribuem para causar a fadiga dos materiais e, consequentemente, levam à paragem dos aerogeradores.

Uma turbina eólica é constituída, normalmente, por três pás, criando-se um sistema equilibrado. Qualquer alteração na massa das pás origina um desequilíbrio no sistema, originando uma redução no desempenho do sistema, provocando vibrações indesejáveis, que podem levar à paragem do sistema. A figura 35 mostra o modelo simplificado de um rotor de três pás, usado para estudar o comportamento das pás em situação de desequilíbrio de massas.

Em condições de operação normal, em que as massas ( $m_i$ ) estão perfeitamente equilibradas, verificam-se as condições representadas pela equação 4.

$$m_1 * r_1 = m_2 * r_2 = m_3 * r_3 \quad (4)$$

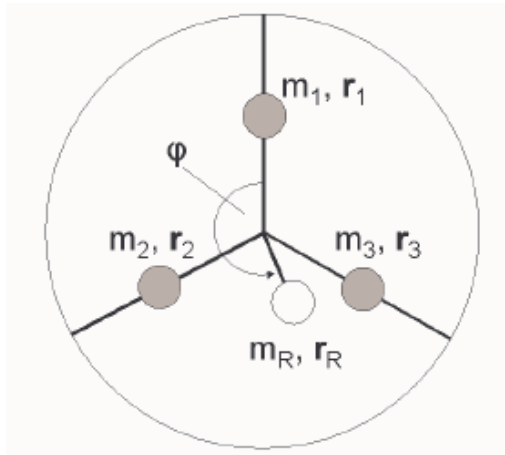


Figura 35 - Modelização de um desequilíbrio nas massas das pás [32].

Nestas condições, o valor absoluto das forças centrífugas ( $F_{Ci}$ ) é igual para cada pá e devido à geometria simétrica do rotor, a soma dos três vectores será zero, conforme a equação 5.

$$F_{C1} + F_{C2} + F_{C3} = 0 \quad (5)$$

Qualquer alteração dos parâmetros, ( $m_i * r_i$ ), origina o desequilíbrio do rotor.

A massa ( $m_i$ ) altera-se se, por exemplo, houver uma infiltração de água para o interior da pá, enquanto, o raio ( $r_i$ ) altera-se se existirem acessórios soltos no interior da pá. Existem, no entanto, outras causas para o desequilíbrio das massas, como sejam os defeitos de fabrico ou problemas relacionados com os materiais usados.

O desequilíbrio de massas pode ser descrito uma massa virtual ( $m_R$ ) a uma distância virtual ( $r_R$ ). Esta massa irá induzir uma força centrífuga resultante, no eixo do rotor e, daí, à cabina e à estrutura de suporte.

A assimetria aerodinâmica do rotor é causada, quando as pás têm comportamentos aerodinâmicos diferentes. Por exemplo, se o ângulo de ataque de uma pá (relacionado com sistema de *pitch*) é diferente das demais. As forças periódicas que surgem devido à assimetria aerodinâmica das pás e do rotor podem gerar dois tipos diferentes de oscilação na cabina. A primeira, oscilação na direcção do eixo do rotor, também designada por oscilação axial, e a segunda, designada por oscilação torsional, em torno do eixo da torre vertical. A causa destes dois tipos de oscilação está relacionada com os momentos de flexão da cabina e da torre. Para a oscilação axial, o momento de flexão é máximo quando a pá está na posição vertical. Para a oscilação torsional, o momento de flexão é máximo quando a pá está na posição horizontal.

As descargas eléctricas atmosféricas, que frequentemente atingem as pás, podem causar estragos nas pás, por exemplo, fissuras ou em casos extremos, a sua destruição. As fissuras nas pás, que com o tempo vão aumentar, diminuem o desempenho aerodinâmico da pá, e conseqüentemente, o rendimento da turbina eólica. A figura 36 mostra as fissuras numa pá [34].

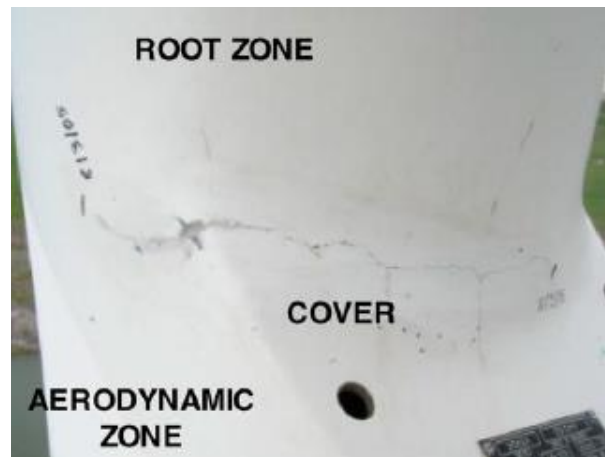


Figura 36 - Fissuras numa pá [34].

Se os estragos forem elevados, que obriguem à substituição da pá, haverá a necessidade de utilização equipamentos especializados. A figura 37 exemplifica a operação de substituição de uma pá [35].



Figura 37 - Substituição de uma pá [35].

As pás são usualmente construídas em fibras de vidro e resinas *epoxy*. A protecção das pás contra descargas eléctricas atmosféricas é feita através de pequenos discos de cobre que estão ligados a um condutor de alumínio que percorre o interior da pá e que liga ao sistema de protecção contra descargas atmosféricas do aerogerador. Estão representados na figura 38, de acordo com a Norma IEC 61400-24 [33], as várias metodologias utilizadas para a protecção das pás contra descargas atmosféricas nas turbinas eólicas modernas.

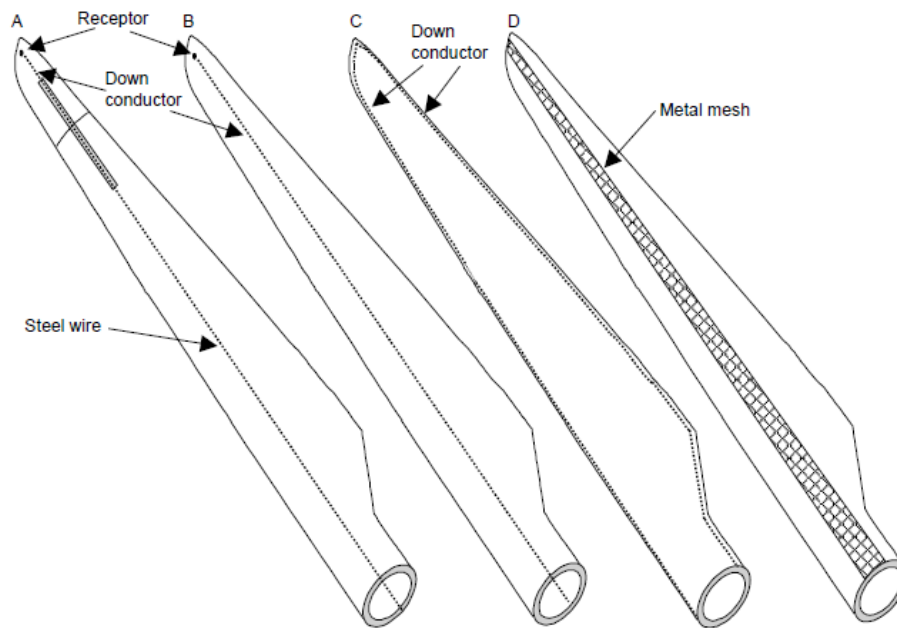


Figura 38 - Protecção contra descargas atmosféricas nas turbinas eólicas modernas [33].

### 3.2.2. Caixa de engrenagens

A caixa de engrenagens, quando existe, está alojada na cabina, entre o rotor e o gerador eléctrico. É um equipamento puramente mecânico, com várias partes rotativas. Este componente é utilizado para adaptar a baixa frequência do rotor da turbina, para a frequência do gerador eléctrico, isto é, da rede eléctrica.

Excepto em alguns casos, como problemas na concepção ou defeitos no equipamento, normalmente as modernas caixas de engrenagens não falham nos primeiros anos de operação. As turbinas da classe 1,5 a 3 MW foram construídas com a experiência adquirida sobre caixas de engrenagens mais pequenas, onde as avarias eram um problema crónico. O *design* das caixas de engrenagens foi melhorando, permitindo que as mesmas funcionem correctamente nos primeiros anos de operação. No entanto, inspecções realizadas após 3 a 5 anos nas caixas de engrenagens, mostram que o desgaste deste equipamento leva normalmente a falhas graves, que originam a

necessidade de grandes reparações ou até mesmo a sua substituição após alguns anos [40].

Com efeito, as falhas nas caixas de engrenagens são considerados como uma das causas mais graves de degradação de uma turbina eólica, e isto, por duas razões. Primeiro, devido ao alto custo de reparação ou substituição da caixa de engrenagens e, por outro lado, por causa do tempo de inactividade resultante. A substituição deste equipamento representa cerca de 10% do custo total da turbina eólica. Acresce ainda os custos de transporte do equipamento para o local, o aluguer de gruas e o custo da mão-de-obra empregue na substituição [40].

A figura 39 ilustra a instalação/substituição de uma caixa de engrenagens [41].



Figura 39 - Instalação de uma caixa de engrenagens [41].

A caixa de engrenagens é um componente puramente mecânico, com várias partes rotativas. As principais causas de avarias ocorrem, geralmente, devido à falta de lubrificação, desgaste dos materiais, falhas nos rolamentos e à quebra dos dentes das engrenagens [36].

Uma revisão às falhas, nas engrenagens e nas caixas de engrenagens, efectuada pelo *Neale Consulting Engineers Ltd*, revelou que, normalmente, as avarias nas engrenagens são precedidas por avarias nos rolamentos. Isto pode parecer surpreendente, dado que os rolamentos usados nas caixas de engrenagens estão

---

sujeitos a menos esforços que as engrenagens. As engrenagens têm um substancial deslizamento no contacto com os dentes e significativas tensões de flexão nos dentes. No entanto, os rolamentos operam sob elevadas pressões de contacto e são susceptíveis aos efeitos de pequenas partículas de detritos no lubrificante, proveniente do desgaste das peças. Este pode ser um dos motivos pelos quais os rolamentos se avariaram antes de as engrenagens [42].

Excluindo os erros de concepção, os erros de fabricação são muito reduzidos. Há casos em que foram detectados pequenos erros de fabricação ou deficiências menores, no entanto, as investigações mostraram que tiveram pouca ou nenhuma importância na avaria. No entanto, podem ocorrer devido ao uso de materiais de menor qualidade, que mais tarde levam ao aparecimento de fissuras na caixa.

As causas que mais influenciam o aparecimento de falhas na caixa de engrenagens são os desalinhamentos, os rolamentos, a instabilidade térmica (fuga térmica), as vibrações laterais e torsionais, a possibilidade de cargas inesperadas e a lubrificação.

Os desalinhamentos afectam tanto as engrenagens como os rolamentos, e são a causa mais comum de falha. Nas engrenagens revela-se no prematuro *pitting* numa das extremidades do dente, enquanto nos rolamentos apresentam-se como sulcos. As causas de desalinhamento podem ser estáticas, devido a erros de fabricação ou de concepção, ou dinâmicas, devido a deformações elásticas dos componentes sob carga.

Os rolamentos são bastante sensíveis a vários efeitos, tais como, os desalinhamentos, os detritos e os contaminantes, as deficiências na lubrificação e as vibrações. São também susceptíveis a danos provocados por forças excessivas durante a montagem dos acoplamentos.

A instabilidade térmica manifesta-se quando a falha se deve à grande diferença de temperatura entre o eixo interior do rolamento e a caixa em seu torno. A expansão térmica diferencial provoca folga no rolamento e este torna-se pré-carregado. Este fenómeno originará um aumento da temperatura diferencial.

A probabilidade de ocorrência de falhas, por causa das vibrações (torsionais e laterais), nas caixas de engrenagens, é cada vez maior. A tendência geral encaminha-se para máquinas de maior potência, com maiores velocidades e maiores tensões. Quando todas as massas relevantes são conhecidas, a análise é simples, no entanto, em turbinas eólicas a situação é diferente.

As cargas inesperadas podem ocorrer por uma série de razões. Excesso de velocidade da máquina, causado pelos temporais ou devido a falhas na rede, grandes variações de binário a velocidades baixas e cargas extremas, fazem com que a caixa de engrenagens fique sujeita a cargas, várias vezes superiores ao binário nominal, podendo provocar uma falha grave no equipamento.

O bom desempenho de uma caixa de engrenagens está fortemente relacionado com uma boa lubrificação. Para que isso aconteça, deverá ser tomada em consideração, entre outras, o local em que a turbina eólica irá ser instalada, dado que, a temperatura ambiente tem um papel relevante no comportamento do óleo. Quando a turbina eólica opera a temperaturas muito baixas, a tendência é para que o óleo se torne espesso, dificultando a lubrificação de todos os elementos constituintes da caixa de engrenagens. Se por outro lado, o óleo aquecer demasiado, as suas características irão deteriorar-se, havendo o risco de combustão do óleo (*flash point*).

A taxa de avarias dos rolamentos de uma caixa de engrenagens é dependente do tipo de rolamento. Os componentes com uma taxa de avarias mais elevada são os rolamentos planetários, os rolamentos do veio intermédio e os rolamentos do veio de alta velocidade. Os componentes com uma taxa de avarias mais baixa são os rolamentos portadores planetários e os rolamentos livres [43].

Os sintomas mais comuns das anomalias em caixas de engrenagens são: o desgaste das rodas dentadas e dos rolamentos, o aumento de temperatura, o ruído e as vibrações.

### **3.2.3. Gerador**

O gerador eléctrico é um elemento preponderante numa turbina eólica e as suas avarias provocam tempos de paragem elevados. Os fabricantes destes equipamentos estão, sob pressão, para diminuir os custos de manutenção e evitar paragens não programadas, que podem resultar na perda de produção e receita. Quando ocorre uma avaria no gerador eléctrico, os custos envolvidos são bastante elevados e, geralmente, a substituição do componente com defeito resolve o problema.

O gerador eléctrico é considerado como uma máquina robusta, muito desenvolvida e testada, no entanto, as falhas eléctricas ocorrem com alguma frequência. Esperava-se que estes equipamentos não apresentassem problemas eléctricos relevantes, no entanto, a realidade demonstra o oposto. A figura 40 mostra um gerador assíncrono duplamente alimentado que equipa um aerogerador.



Figura 40- Gerador eléctrico de um aerogerador [44].

O gerador eléctrico, como qualquer máquina eléctrica rotativa, é submetido a forças electromagnéticas e mecânicas durante o seu funcionamento. A sua construção determina que a interacção entre estas forças, em condições normais de funcionamento, tem um comportamento estável, com o mínimo de vibrações e ruído. Quando a falha ocorre, perde-se o equilíbrio entre estas forças, o que leva a um aumento considerável das vibrações e ruído [45].

As falhas no gerador eléctrico podem ser classificadas em dois tipos: mecânicas e eléctricas. As origens das falhas podem ser internas ou externas (razões ambientais), como apresentado na figura 41 [45].

As falhas internas, podem ser classificadas, de acordo, com a sua origem (eléctrica ou mecânica) ou sua localização (estator ou rotor). Usualmente, outro tipo de falhas, como as falhas nos rolamentos, estão associadas às falhas no rotor, visto serem partes móveis, conforme apresentado na figura 42 [45].

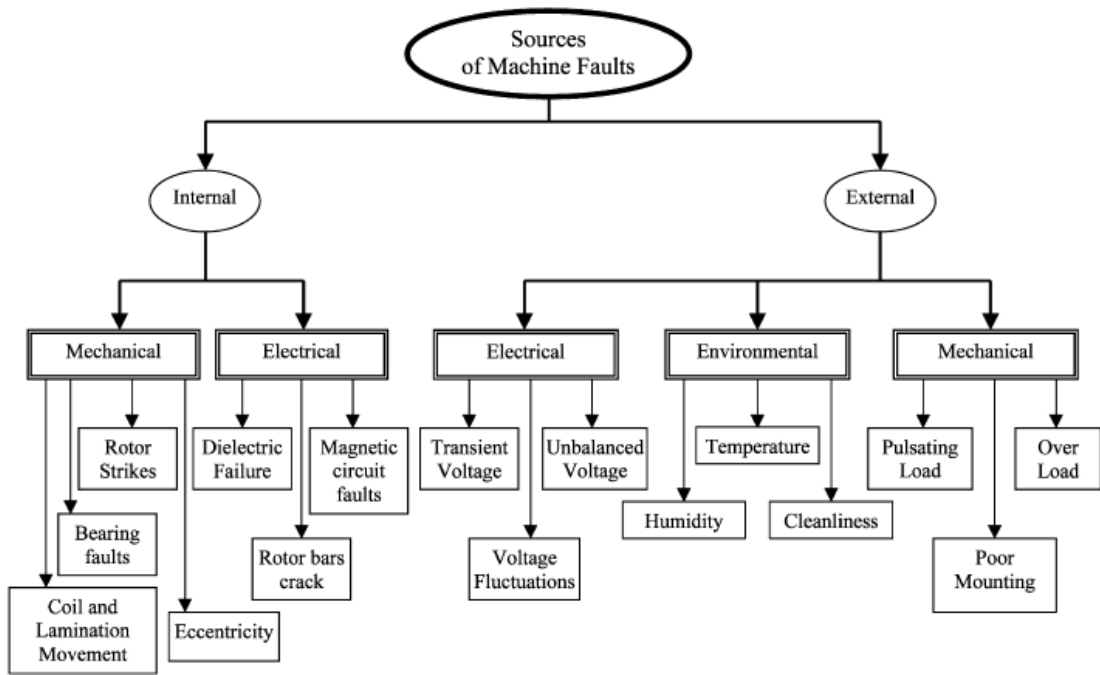


Figura 41 - Origem das falhas nos geradores eléctricos [45].

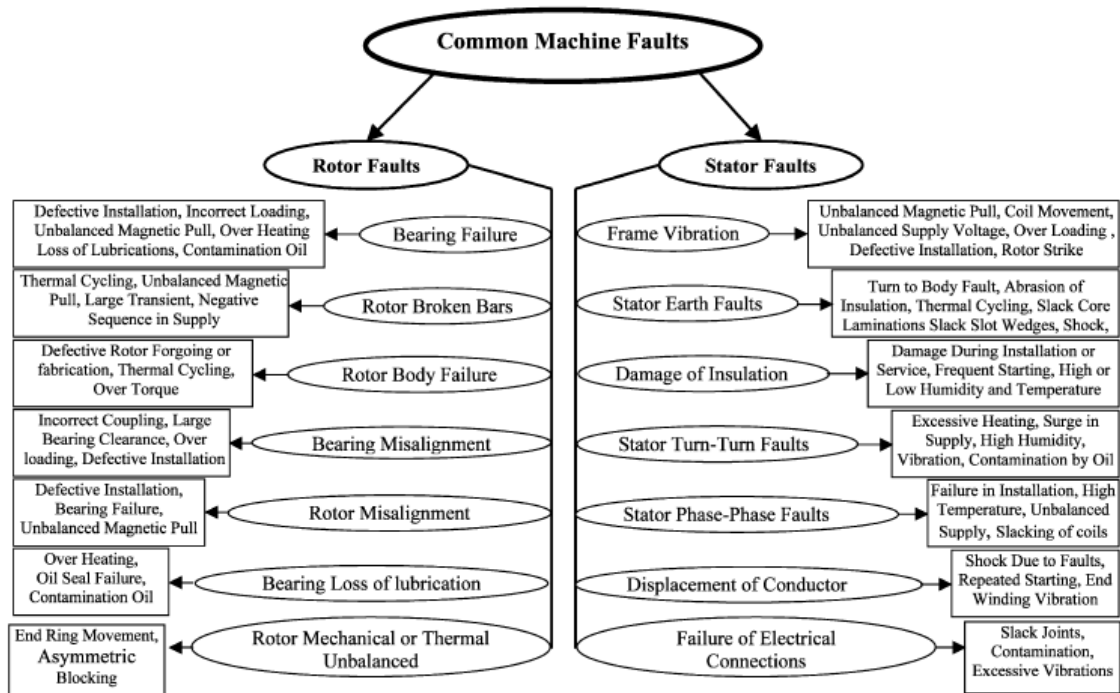


Figura 42 - Avarias mais frequentes nos geradores eléctricos e suas causas [45].

Muitos relatórios demonstram que as falhas nos rolamentos e as quebras de isolamento no estator provocam a maioria das avarias. Estes relatórios revelam que a percentagem de falhas nos componentes dos geradores são 40% relacionadas com os rolamentos, 38% relacionadas com o estator e 10% relacionadas com o rotor [46].

A maioria das máquinas eléctricas usa rolamentos. Cada rolamento é constituído por dois anéis, um interior e outro exterior. Entre os dois anéis, é colocado em “pistas” um conjunto de esferas. Mesmo em condições normais de funcionamento, as falhas por fadiga podem acontecer, provocando um aumento da vibração e do ruído. Estas falhas podem dever-se à contaminação (por pequenas partículas), à corrosão (por acção da humidade), à lubrificação inadequada (provocando aquecimento e abrasão) ou à instalação inadequada dos rolamentos.

Normalmente, as falhas no estator estão relacionadas com o abaixamento da resistência de isolamento. As principais causas podem estar relacionadas com altas temperaturas, humidade, sujidade e outros materiais poluentes ou danos mecânicos.

Na instalação ou durante as acções periódicas de manutenção aos enrolamentos de um gerador, devem ser tidos em consideração as condições de climatização da área onde o gerador vai trabalhar. A climatização conveniente do gerador deve ser prioritária, de modo a garantir as melhores condições de funcionamento possíveis. Qualquer poeira ou resíduos estranhos, dentro do estator ou do rotor, durante este processo pode vir a causar sérios problemas ao gerador, de modo que, os contaminantes devem ser evitados [47].

Os componentes mais caros de reparação de um gerador eléctrico são os enrolamentos eléctricos do rotor e do estator. Muitos fabricantes usam materiais de classe F, que são a classe isolamento mínima exigida, à qual corresponde uma temperatura de 155 °C, temperatura que o isolamento suporta sem se degradar, durante um curto período de tempo. O calor desenvolvido durante o funcionamento do gerador é prejudicial ao isolamento dos enrolamentos do estator e do rotor. A simples actualização da classe isolamento, para a classe H, à qual corresponde uma temperatura de 180 °C, permitirá que o gerador funcione a uma temperatura mais elevada, com um pequeno custo adicional. A figura 43 mostra a actualização de isolamento num gerador eléctrico, para a classe H [47].



Figura 43 - Aplicação de películas isolantes às espiras [47].

A alta temperatura, o desgaste, a vibração e pó nas escovas de carbono podem originar defeitos entre as fases do enrolamento.

Os rotores dos geradores assíncronos em gaiola de esquilo podem ter fendas nas barras ou problemas de contacto nas ligações das barras e nos anéis de curto-circuito. Podem ser causados por *stress* térmico, por *stress* magnético, por *stress* dinâmico, por *stress* mecânico ou por problemas decorrentes da contaminação e abrasão do material que constitui o rotor (devido a substâncias químicas ou humidade).

Outro problema que afecta os geradores é a sua excentricidade. Isto significa que o espaço existente entre o estator e o rotor não é simétrico, geralmente provocando assimetrias eléctricas nos geradores. Quando a excentricidade é grande, as forças radiais resultantes vão estar em desequilíbrio, o que pode provocar o contacto entre o estator e o rotor, resultando em danos para ambos.

Os colectores e as escovas são componentes que devido ao desgaste, aumento da aspereza da superfície dos anéis ou da face de contacto dos anéis, quebra do material de carbono das escovas e forças de pressão de contacto decrescente, resultantes do uso continuado, levam a falhas do gerador. Por esse motivo, o correto ajuste e manutenção das escovas é essencial [16].

Grande parte das anomalias que podem ocorrer no gerador tem como característica o aumento da temperatura devido à existência de pontos quentes ou arco eléctrico no contacto entre escovas e anéis [16].

### 3.3. Sistemas de monitorização e detecção de avarias. Sistema SCADA

A monitorização do estado de um qualquer processo industrial é hoje em dia uma ferramenta indispensável. A detecção precoce de falhas incipientes previne o acontecimento de falhas maiores, permitindo aos operadores e responsáveis pelo escalonamento da manutenção ter informação precisa sobre o estado de funcionamento da máquina/sistema. Isto permite um escalonamento da manutenção eficiente e a adopção de estratégias de reparação convenientes. Apesar das modernas turbinas eólicas terem atingido um alto nível de desenvolvimento, existe ainda um grande potencial no seu desenvolvimento, especialmente nas turbinas eólicas de grande potência. Para que a produção de energia eólica seja competitiva relativamente a outros tipos, melhorias na disponibilidade, na segurança e no tempo de vida das turbinas deverão ser alcançados. A melhoria no desempenho é significativa quando existem manutenções eficientes e estratégias de reparação adequadas. A monitorização *online* e as técnicas de detecção precoce permitem que as pequenas falhas mecânicas e eléctricas sejam sinalizadas, de forma a evitar que se transformem em falhas maiores, evitando efeitos secundários sobre outros componentes. Além disso, a monitorização *online* detecta outro tipo de condições, tais como, as condições climáticas, podendo accionar acções de controlo apropriadas, se for esse o caso. Desta forma, os custos de manutenção globais e os tempos de inactividade são significativamente reduzidos. Estes sistemas de monitorização e previsão de avarias baseiam o seu prognóstico com base na medição de parâmetros, tais como, a velocidade de rotação, a potência e a temperatura do gerador. Poderão existir ainda medidas complementares, tais como, a medida de vibrações em determinados componentes ou oscilações estruturais [17].

Os custos com a manutenção das turbinas dos parques eólicos assumem um peso importante na exploração dos parques. Com estes custos a assumirem um peso cada vez mais importante na exploração dos parques eólicos, e sabendo que os operadores tendem a explorar os seus parques da forma mais económica possível, necessitam de técnicas de planeamento da manutenção que conduzam a uma efectiva redução de custos de exploração [18].

Os primeiros esquemas de manutenção aplicados aos sistemas eólicos eram baseados em técnicas correctivas, isto é, os componentes eram substituídos apenas quando se avariavam. Existiam apenas acções de substituição de elementos de desgaste rápido, tais como o óleo e os filtros. À medida que as máquinas foram crescendo em termos de potência, preço e complexidade, esta estratégia deixou de fazer sentido, sendo implantadas inspecções periódicas com vista a aferir o estado de funcionamento das máquinas [19].

A rápida expansão de parques eólicos atraiu uma particular atenção aos aspectos operacionais e de manutenção. As soluções de monitorização têm vindo a ser desenvolvidas com o objectivo de detectar e diagnosticar anomalias nos diversos subsistemas que compõem os aerogeradores, de forma a reduzir os seus custos de operação e manutenção. Estes parques, com localizações cada vez mais remotas e de acesso mais difícil, causam problemas na manutenção dos aerogeradores. Para uma turbina com 20 anos de serviço, a operação, a manutenção e os custos de substituição estavam estimados em pelo menos 10 a 15% da sua capacidade de produção [20].

As modernas turbinas eólicas estão hoje equipadas com sistemas de monitorização e detecção de avarias. Um elemento essencial num parque eólico é o sistema *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Este sistema actua como “sistema central”, dado que interliga todas as turbinas eólicas existentes no parque eólico, a subestação e os dados meteorológicos, a um computador central. Este computador e o sistema de comunicação associado permitem ao operador supervisionar o comportamento de todas as turbinas e do parque eólico. O sistema *SCADA* mantém um registo de toda a actividade numa base de tempo de 10 minutos, o que permite ao operador determinar qual a acção correctiva a tomar, caso seja necessário. Regista igualmente o nível de energia produzido, disponibilidade, erros e sinais de falha, os quais servem de base para questões de garantia e de reclamações. O sistema *SCADA*, também tem que implementar todos os requisitos do contrato de ligação, de modo a controlar a produção de potência reactiva, a tensão da rede, o controlo de frequência ou limitar a potência de saída, em resposta às instruções do operador da rede. O sistema *SCADA* regista as datas de ocorrência das falhas no sistema, deste modo, em conjunto com as ordens de trabalho de manutenção e os respectivos relatórios, é possível aferir o tipo específico de falha e os componentes envolvidos.

Em resumo, as principais funções de um sistema *SCADA* são [24]:

- Aquisição de dados: Permite a aquisição de dados a partir de equipamentos instalados (sensores) nas unidades remotas. Permite adquirir o estado do sistema, medindo e indicando valores de grandezas através de uma leitura cíclica.
- Monitorização e processamento de eventos: Nesta função, processa-se a monitorização do estado, monitorização de limites e processamento de limites onde todos os acontecimentos detectados são processados e armazenados na base de dados.
- Funções de controlo: Esta função permite controlar individualmente cada equipamento controlado a partir do centro de controlo

Os componentes críticos de uma turbina eólica típica estão identificados. A caixa de engrenagens, o gerador, as pás e o sistema de transmissão, são os componentes considerados críticos, na medida em que originam os maiores tempos de indisponibilidade e necessitam de equipamentos, tais como guias, difíceis de deslocar e com disponibilidade reduzida. Este problema agravasse quando se trata de instalações *offshore*.

### **3.4. Medidas obtidas pelo sistema SCADA**

O funcionamento de um parque eólico é monitorizado e controlado por um sistema de controlo de supervisão e de aquisição de dados (*SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition*). Este sistema estabelece a ligação entre todos os componentes do parque eólico e um computador central (normalmente através de uma rede de fibra óptica). O sistema fornece e armazena informação relativa ao funcionamento do parque eólico, podendo ser identificadas falhas ou problemas de funcionamento (de acordo com o tipo de anomalia, o autómato que gere o funcionamento da turbina pode sinalizar um estado de emergência ou até parar o funcionamento da mesma, como forma de protecção).

Nos aerogeradores instalados no parque que serviu de caso de estudo, o sistema de automação monitoriza vários equipamentos, analisando anomalias ou alarmes. O sistema de automação regista também eventos que, não sendo considerados anomalias do sistema, são importantes para se saber o estado de alguns componentes.

Quando os parques eólicos têm centros de controlo dedicados, os operadores, na presença de uma anomalia ou alarme, podem resolver o problema, o que é uma grande vantagem.

Para além do registo de anomalias e alarmes, são também guardadas algumas medidas importantes para os sistemas de monitorização. Essas medidas são valores médios registados, normalmente, de 10 em 10 minutos e obtidas pela utilização de diversos sensores instalados nos sistemas que se pretendem monitorizar. Normalmente as grandezas medidas representam temperaturas, velocidades, grandezas eléctricas, e ângulos. Para os aerogeradores que serviram de base de estudo, as grandezas medidas e guardadas, em valores médios de 10 minutos, estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Lista de grandezas medidas pelo sistema SCADA.

Medida	Tipo	Período	Unidade
Velocidade do vento - <i>AvgWindSpeed</i>	Média Máxima Mínima Desvio Padrão	10 Min	m/s
Ângulo de <i>pitch</i>	Média	10 Min	graus
Velocidade de rotação do gerador	Média Máxima Mínima Desvio Padrão	10 Min	rpm
Potência eléctrica - <i>AvgPower</i>	Média Máxima Mínima Desvio Padrão	10 Min	W
Cos $\varphi$	Média	10 Min	-
Frequência	Média	10 Min	Hz
Tensão nas fases - <i>AvgVoltage</i>	Média	10 Min	V
Intensidade de corrente nas fases - <i>AvgCurrent</i>	Média	10 Min	A
Temperatura ambiente - <i>AvgTemp1</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura do sistema hidráulico – <i>AvgTemp2</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura do óleo da caixa de engrenagens – <i>AvgTemp3</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura do gerador – <i>AvgTemp4</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura do <i>slip ring</i> – <i>AvgTemp5</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura dos rolamentos – <i>AvgTemp6</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura do quadro de controlo das pás – <i>AvgTemp7</i>	Média	10 Min	°C
Temperatura da <i>nacelle</i> – <i>AvgTemp8</i>	Média	10 Min	°C

## **4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL DE AEROGERADORES EM SITUAÇÃO DE ANOMALIA**



#### 4.1. Caso de estudo

Para o estudo efectuado, foram utilizados os dados SCADA de um parque eólico situado em Portugal. O parque é composto por treze aerogeradores de eixo horizontal e velocidade variável, equipados com um gerador assíncrono duplamente alimentado de 2 MW. A altura ao centro do rotor é de 67 metros e o diâmetro do rotor é de 80 metros. A velocidade de “cut-in” é de 4 m/s e a velocidade de “cut-out” é de 25 m/s. Estes aerogeradores estão equipados com uma caixa de engrenagens planetária de eixos paralelos. O parque eólico possui também uma torre meteorológica e uma subestação para interligação entre o parque eólico e a rede eléctrica receptora.

#### 4.2. Avarias analisadas

De acordo com o referido no capítulo 3, existem alguns componentes críticos numa turbina eólica típica, nomeadamente as pás, a caixa de engrenagens e o gerador eléctrico. As avarias nestes equipamentos originam elevados tempos de indisponibilidade e necessitam de equipamentos difíceis de deslocar e com disponibilidade reduzida.

Existiram alguns problemas relacionados com esses equipamentos no parque eólico em estudo. O registo feito pelo promotor do parque até 2009 salienta a existência de problemas relacionados com a caixa de engrenagens em nove dos treze aerogeradores, tendo como consequência a substituição das mesmas. Em sete caixas de engrenagens, o problema detectado foi a existência de fissuras no corpo da caixa, que levava à perda de óleo. Em duas caixas, a causa da substituição deveu-se à quebra de dentes nas rodas dentadas [16]. Foram estas as razões que levaram à escolha deste equipamento para análise.

A caixa de engrenagens é um equipamento puramente mecânico, com várias partes rotativas, dependendo da velocidade do vento e da carga do gerador. Uma das principais causas de avarias ocorre devido à falta de lubrificação.

A estabilidade térmica de um lubrificante é essencial para o funcionamento óptimo de um sistema mecânico. Todos os lubrificantes têm limites aceitáveis de operação (para altas e baixas temperaturas). A máquina perde estabilidade e expõem-se a avarias se estes regimes de temperatura são violados. Isto pode resultar em avarias no material e na rápida degradação dos componentes que constituem a máquina. As temperaturas extremas têm um efeito nefasto nos componentes da máquina e na sua performance. Quando a temperatura é muito baixa, a viscosidade é elevada. Frequentemente, para temperaturas muito baixas, o lubrificante chega ao ponto de congelamento, deixando de ter a capacidade de fluir. As altas temperaturas reduzem a durabilidade, aumenta a oxidação e afecta outros aspectos críticos da máquina [52].

A durabilidade de um lubrificante pode ser reduzida em 50% por cada 8 °C que a temperatura do mesmo suba, para valores superiores a 60 °C. A estabilidade térmica de um lubrificante é a sua capacidade de resistência à decomposição, apenas devido à temperatura. Estabelece o limite máximo de temperatura para um lubrificante garantir o serviço em condições contínuas. O óleo pode incendiar se a sua temperatura atingir o limite definido pelo *flash point* [52].

Detritos causados pela degradação do óleo ou pela degradação dos materiais são também causadores do aumento de temperatura, devendo por isso ser sujeitos a rigorosos testes.

Com vista a aferir o desempenho da caixa de engrenagens, as grandezas analisadas serão a temperatura do óleo de lubrificação e o tempo de funcionamento por escalão de potência do gerador. Será analisada a sua relação, uma vez que, a potência do gerador é uma grandeza importante no processo de detecção de avarias na caixa de engrenagens.

### **4.3. Método de análise desenvolvido**

O método desenvolvido para a análise comportamental da caixa de engrenagens perante uma avaria, assenta numa análise exaustiva aos dados do parque. Os dados disponibilizados foram o registo das medidas efectuadas pelo sistema de SCADA (valores médios, de dez minutos, das diversas grandezas do aerogerador), nos anos de 2006, 2007 e 2008, e o registo das indisponibilidades ocorridas nos anos de 2006 e 2007.

Com o objectivo de se definir um padrão de comportamento normal da temperatura do óleo da caixa de engrenagens, foi analisada a sua variação, em cada aerogerador, nos anos de 2006, 2007 e 2008.

De acordo com a análise dos dados de variação da temperatura do óleo da caixa de engrenagens, foi possível definir o intervalo entre os 45 °C e os 65 °C como sendo ideal para o funcionamento da caixa de engrenagens [16].

Os aerogeradores estão equipados com um sistema de arrefecimento de óleo, para impedir que este atinja temperaturas elevadas.

Um dos factores que influencia a temperatura do óleo da caixa de engrenagens é o regime de funcionamento da máquina. Foram por isso elaboradas tabelas, para cada aerogerador, com as temperaturas médias do óleo, em condições normais de funcionamento, para cada 100 Watts de variação da potência. Quando a análise foi inconclusiva, considerando apenas a temperatura do óleo de lubrificação, foi

igualmente analisado o tempo de funcionamento em cada regime de carga. O objectivo foi verificar a relação destas grandezas, em função da potência pelo gerador.

#### 4.4. Análise dos resultados

Para este estudo, foram analisados cinco aerogeradores. Os aerogeradores 2 e 10, não necessitaram de substituição da caixa de engrenagens. Nos aerogeradores 3, 5 e 11 foi necessária a sua substituição. A análise comportamental da caixa de engrenagens foi feita para os anos de 2006, 2007 e 2008.

##### 4.4.1. Aerogeradores sem avarias

###### *Aerogerador 10*

O aerogerador 10 não necessitou de substituição da caixa de engrenagens até ao final do ano de 2008 [16]. A tabela 4 apresenta a evolução da temperatura média anual do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens, para os anos de 2006, 2007, 2008, por escalão de potência.

Tabela 4 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10.

Aerogerador 10	2006	2007	2008
Potência (kW)	<i>AvgTemp3</i> (°C)	<i>AvgTemp3</i> (°C)	<i>AvgTemp3</i> (°C)
0 - 100	45,5	45,8	53,1
100 - 200	48,4	49,7	53,7
200 - 300	50,9	52,0	53,5
300 - 400	52,1	53,3	54,0
400 - 500	52,9	54,3	54,2
500 - 600	53,3	53,9	55,2
600 - 700	53,9	54,3	56,1
700 - 800	53,5	54,3	56,8
800 - 900	53,4	54,2	57,2
900 - 1000	52,9	53,9	58,0
1000 - 1100	52,8	54,0	58,6
1100 - 1200	52,8	54,0	58,9
1200 - 1300	53,1	54,4	59,7
1300 - 1400	53,3	54,5	60,0
1400 - 1500	54,2	54,9	60,3
1500 - 1600	54,9	55,4	60,6
1600 - 1700	55,6	56,2	61,0
1700 - 1800	56,4	57,2	61,1
1800 - 1900	57,1	58,1	61,4
≥ 1900	58,1	59,3	61,9

Analisando com mais detalhe, verificamos que a evolução da temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, para o ano de 2006, está dentro dos valores normais de funcionamento. A temperatura média do óleo da caixa de engrenagens aumenta sempre que a potência aumenta. É também influenciada pela temperatura ambiente. Assim, se o aerogerador está a funcionar durante os meses de Verão, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens é mais elevada. Ao invés, se o aerogerador está a funcionar durante os meses de Inverno, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens é mais baixa. Isto verifica-se no aerogerador 10, como se observa nas tabelas 5 e 6, no ano de 2006.

Tabela 5 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10.

Aerogerador 10	Jan-06	Fev-06	Mar-06	Abr-06	Mai-06	Jun-06
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	44,9	45,0	45,2	44,7	46,8	49,0
100 - 200	47,1	47,4	47,8	47,0	49,4	51,6
200 - 300	49,2	49,5	50,7	50,2	51,4	53,4
300 - 400	51,2	51,8	52,5	52,1	52,6	53,7
400 - 500	52,9	52,9	53,4	53,1	54,0	52,7
500 - 600	53,8	53,2	54,1	53,0	54,4	52,7
600 - 700	54,1	53,7	54,1	53,0	54,0	53,0
700 - 800	54,3	53,8	53,4	53,2	53,5	53,0
800 - 900	53,9	53,7	53,3	52,5	53,2	53,4
900 - 1000	53,3	53,2	52,5	52,0	52,6	54,2
1000 - 1100	53,0	52,8	51,7	51,8	52,8	54,3
1100 - 1200	52,3	52,1	52,1	52,3	52,1	55,2
1200 - 1300	51,8	52,0	51,5	52,5	52,4	54,7
1300 - 1400	51,8	51,5	51,6	52,9	53,0	55,9
1400 - 1500	52,4	51,4	52,2	53,3	53,7	56,1
1500 - 1600	52,1	51,8	52,2	54,4	54,0	56,6
1600 - 1700	52,1	51,8	52,6	53,7	55,3	57,6
1700 - 1800	52,5	52,0	53,6	54,7	56,1	58,4
1800 - 1900	53,8	53,1	54,6	56,6	57,6	58,3
≥ 1900	54,5	53,9	56,6	58,1	57,7	59,0

Tabela 6 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 10 (cont.).

Aerogerador 10	Jul-06	Ago-06	Set-06	Out-06	Nov-06	Dez-06
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	50,8	51,5	51,8	45,8	45,1	44,1
100 - 200	52,9	52,0	52,2	48,6	48,1	46,8
200 - 300	52,8	52,3	51,3	50,8	50,9	48,9
300 - 400	52,7	52,8	51,6	51,6	52,0	50,4
400 - 500	52,3	53,5	52,3	51,5	52,8	52,1
500 - 600	53,3	54,2	53,3	51,3	53,0	52,9
600 - 700	54,2	54,6	54,1	51,4	52,3	53,4
700 - 800	54,8	55,4	54,1	52,1	52,3	53,0
800 - 900	55,1	56,1	55,0	52,2	52,5	52,9
900 - 1000	55,4	56,7	56,0	52,6	52,5	52,3
1000 - 1100	56,1	57,0	56,4	52,7	52,7	52,3
1100 - 1200	56,9	57,5	57,4	53,1	53,0	52,5
1200 - 1300	57,2	57,7	57,5	54,4	53,6	52,6
1300 - 1400	57,8	58,2	57,6	54,7	53,6	52,7
1400 - 1500	57,7	58,2	58,2	55,2	54,7	53,3
1500 - 1600	58,9	58,7	58,8	55,7	55,4	53,4
1600 - 1700	58,8	59,4	59,0	55,9	56,0	54,5
1700 - 1800	58,8	59,6	59,1	56,8	56,6	55,2
1800 - 1900	59,2	60,3	59,1	57,7	56,6	56,1
≥ 1900	60,2	60,5	60,1	58,0	58,8	57,9

Como se pode verificar nas tabelas 5 e 6, o aerogerador 10 teve uma evolução espectacular da temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens. Houve um aumento do seu valor médio à medida que potência foi aumentando, assim como, durante os meses de Verão, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens foi mais elevada.

## Aerogerador 2

O aerogerador 2 não necessitou de substituição da caixa de engrenagens até ao final do ano de 2008 [16]. A tabela 7 apresenta a evolução da temperatura média anual do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens, para os anos de 2006, 2007, 2008, por escalão de potência.

Tabela 7 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 2.

Aerogerador 2	2006	2007	2008
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,4	45,5	46,9
100 - 200	48,5	49,2	50,7
200 - 300	51,4	51,3	52,9
300 - 400	52,7	52,6	53,7
400 - 500	53,0	53,2	53,7
500 - 600	53,5	53,5	54,3
600 - 700	53,3	54,0	54,7
700 - 800	53,4	54,0	54,5
800 - 900	52,9	53,9	54,4
900 - 1000	53,6	54,3	54,3
1000 - 1100	53,6	54,2	54,4
1100 - 1200	53,8	54,3	54,5
1200 - 1300	54,6	54,6	54,5
1300 - 1400	54,9	54,5	55,1
1400 - 1500	55,6	55,3	55,4
1500 - 1600	56,4	56,0	55,9
1600 - 1700	56,9	56,1	56,3
1700 - 1800	57,4	57,7	57,5
1800 - 1900	58,3	58,6	58,6
≥ 1900	59,4	60,1	60,0

Tal como no aerogerador anterior, da análise da evolução da temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, não parece existir nenhuma anomalia. No entanto, analisando com mais detalhe, verificamos que a evolução da temperatura média mensal sofre um aumento inusitado em Fevereiro e Março de 2006 e facilmente perceptível na análise efectuada. A tabela 8 ilustra esta evolução. Desde valores relativamente baixos de potência que o aumento da temperatura média do óleo é notório. Em Março de 2006 foram sinalizadas várias anomalias relacionadas com a elevada temperatura do óleo de lubrificação.

Tabela 8 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 2.

Aerogerador 2	Jan-06	Fev-06	Mar-06	Abr-06	Mai-06	Jun-06
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,4	45,4	45,4	45,0	48,2	50,6
100 - 200	48,2	48,5	48,4	48,0	51,0	53,1
200 - 300	50,2	51,1	51,4	51,3	52,2	53,3
300 - 400	52,0	52,7	54,2	52,8	53,4	52,8
400 - 500	53,1	53,9	55,5	52,8	53,8	52,5
500 - 600	53,7	54,8	56,5	53,2	53,8	52,5
600 - 700	53,8	55,8	57,2	52,3	53,5	53,1
700 - 800	53,8	57,1	59,3	52,7	53,2	53,6
800 - 900	52,9	57,3	59,6	52,3	52,6	54,5
900 - 1000	52,6	57,7	60,3	53,6	52,3	55,0
1000 - 1100	52,6	57,7	61,4	53,5	52,5	55,7
1100 - 1200	52,4	60,1	63,6	53,2	52,6	56,5
1200 - 1300	52,4	61,9	64,9	54,6	53,8	57,2
1300 - 1400	52,6	60,7	64,7	54,6	54,5	57,6
1400 - 1500	52,8	63,4	67,1	55,4	54,5	58,1
1500 - 1600	53,4	64,6	67,0	55,5	55,7	59,3
1600 - 1700	53,7	66,5	69,7	55,9	56,4	59,1
1700 - 1800	54,9	63,8	71,0	57,2	57,0	59,6
1800 - 1900	57,2	66,2	72,9	57,6	58,2	59,7
≥ 1900	57,3	65,1	71,9	58,8	61,1	59,7

Em Março de 2006, uma equipa de manutenção foi chamada para verificar um alarme de elevada temperatura atingida pelo óleo da caixa de engrenagens. O *service report* elaborado pela equipa de manutenção indica que a bomba do óleo da caixa de engrenagens estava avariada [16].

O componente foi substituído. Após a sua substituição, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens voltou para os valores normais, o que significa que o mau funcionamento da bomba do óleo estava na origem do aumento considerável da temperatura.

#### 4.4.2. Aerogeradores com avarias

##### **Aerogerador 11**

O aerogerador 11 necessitou de substituição da caixa de engrenagens em Dezembro de 2008. O problema reportado pela equipa de manutenção foi a existência de fissuras nas soldaduras em volta da caixa planetária, estando toda a plataforma da *nacelle* cheia de óleo da caixa de engrenagens. Este relatório foi feito no dia 15 de Dezembro, tendo a caixa de engrenagens sido substituída no dia 26 de Dezembro. O último *service report* elaborado pelas equipas de manutenção, referente ao aerogerador, foi realizado em Julho de 2008, com a indicação de que foram substituídos alguns sensores que estavam danificados [16]. A tabela 9 apresenta a evolução da temperatura média anual do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens, para os anos de 2006, 2007, 2008, por escalão de potência.

Tabela 9 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11.

Aerogerador 11	2006	2007	2008
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,5	46,3	48,1
100 - 200	48,2	49,2	52,3
200 - 300	50,9	51,2	54,3
300 - 400	52,2	52,8	55,4
400 - 500	53,1	52,9	56,6
500 - 600	53,4	53,4	57,9
600 - 700	53,5	53,6	58,1
700 - 800	53,0	53,5	58,4
800 - 900	53,2	53,8	58,4
900 - 1000	52,9	53,6	58,7
1000 - 1100	52,9	54,2	58,9
1100 - 1200	53,1	53,9	59,1
1200 - 1300	54,0	54,5	59,6
1300 - 1400	54,4	55,1	59,3
1400 - 1500	54,8	55,1	59,2
1500 - 1600	55,4	55,5	59,9
1600 - 1700	56,3	56,1	60,5
1700 - 1800	56,7	56,6	61,2
1800 - 1900	57,4	57,3	62,5
≥ 1900	58,2	59,5	64,2

Ao analisarmos a tabela 9, verificamos que a temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, para o ano de 2008, é substancialmente superior aos anos anteriores.

Observando os registos mensais com mais detalhe, verificamos que a partir de Abril de 2008 a temperatura média mensal do óleo de lubrificação aumenta bastante, desde baixos valores de potência.

O *service report* produzido pela equipa de manutenção em Abril de 2008 verificava que existiu uma avaria nos ventiladores da *nacelle*, pelo que a temperatura no interior da mesma atingiu valores elevados e isso levou a que a temperatura da caixa de engrenagens também tivesse sido elevada [16]. Este aumento verifica-se, desde os mais baixos regimes de carga, na análise da tabela 10.

Em Maio de 2008, verifica-se um decréscimo muito ligeiro da temperatura média mensal. No entanto, entre Junho de 2008 e Dezembro de 2008, a tendência volta a ser a do aumento da temperatura média do óleo. Este fenómeno está demonstrado nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11.

Aerogerador 11	Jan-08	Fev-08	Mar-08	Abr-08	Mai-08	Jun-08
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	44,8	43,5	45,2	46,1	46,5	49,9
100 - 200	47,7	47,6	48,4	49,9	50,8	52,9
200 - 300	50,5	50,7	51,1	52,7	53,4	54,1
300 - 400	52,5	52,9	53,3	54,4	55,2	55,7
400 - 500	53,6	53,3	54,7	56,2	57,1	57,2
500 - 600	54,6	54,1	55,4	58,0	58,4	57,7
600 - 700	54,5	53,9	55,6	58,4	59,1	58,1
700 - 800	54,8	54,6	55,4	58,3	59,5	58,6
800 - 900	54,3	54,6	54,5	58,1	60,0	58,5
900 - 1000	53,9	53,9	54,1	58,9	59,8	58,7
1000 - 1100	54,2	53,7	54,3	58,6	60,3	59,1
1100 - 1200	53,7	53,5	54,0	59,1	59,5	59,8
1200 - 1300	54,1	53,7	53,9	58,6	59,7	60,4
1300 - 1400	54,0	54,3	53,8	59,2	59,0	61,0
1400 - 1500	53,8	54,8	53,9	58,8	59,1	61,7
1500 - 1600	54,5	55,3	55,2	59,9	59,7	61,9
1600 - 1700	54,9	56,3	55,6	60,7	59,7	63,5
1700 - 1800	56,2	56,9	56,7	61,8	60,2	63,6
1800 - 1900	57,7	57,5	57,7	62,1	60,8	64,5
≥ 1900	59,1	59,4	58,9	63,1	62,0	66,5

Tabela 11 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 11 (cont.).

Aerogerador 11	Jul-08	Ago-08	Set-08	Out-08	Nov-08	Dez-08
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	50,1	49,9	48,6	49,4	47,6	52,1
100 - 200	52,5	52,6	52,5	52,2	52,4	52,7
200 - 300	54,7	54,4	54,5	54,5	55,1	54,8
300 - 400	55,5	55,2	56,4	56,3	57,0	56,7
400 - 500	56,7	55,9	58,6	56,5	58,8	57,8
500 - 600	58,0	57,0	59,3	57,7	59,3	59,1
600 - 700	58,0	56,9	58,1	58,2	59,6	59,5
700 - 800	58,4	57,2	58,1	59,1	59,8	60,8
800 - 900	58,3	58,4	57,7	59,2	59,7	60,2
900 - 1000	58,7	58,6	58,3	58,3	59,5	60,3
1000 - 1100	58,8	59,1	58,4	59,0	59,9	59,9
1100 - 1200	58,8	60,2	59,1	59,5	59,1	59,3
1200 - 1300	59,6	60,9	59,5	60,3	59,7	59,5
1300 - 1400	60,1	61,8	60,5	59,5	59,4	59,1
1400 - 1500	61,1	63,1	60,0	60,1	59,3	59,0
1500 - 1600	61,3	63,9	60,5	61,1	59,9	59,5
1600 - 1700	63,8	64,2	62,9	61,6	60,3	60,0
1700 - 1800	63,9	65,9	63,2	61,9	60,6	60,6
1800 - 1900	65,5	66,8	64,5	63,0	61,8	62,9
≥ 1900	68,0	69,4	68,1	64,2	65,0	64,2

Como se pode verificar, o aerogerador 11 teve uma evolução atípica da temperatura média do óleo da caixa de engrenagens. Existe um grande aumento do seu valor médio, especialmente quando a potência é elevada. Verifica-se igualmente que nos meses de Inverno, quando eram espectáveis valores médios de temperatura mais baixos, estes foram altos. As altas temperaturas médias do óleo que se verificavam tinham origem no deficiente funcionamento na caixa de engrenagens.

O resultado das análises efectuadas às grandezas, nomeadamente a temperatura do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, do aerogerador 11, encontram-se no Anexo A.

### Aerogerador 3

O aerogerador 3 necessitou de substituição da caixa de engrenagens em Outubro de 2008. A caixa de engrenagens original apresentava fissuras que deixavam sair o óleo [16]. A tabela 12 apresenta a evolução da temperatura média anual do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens, para os anos de 2006, 2007, 2008, por escalão de potência.

Tabela 12 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	2006	2007	2008
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,2	45,3	47,6
100 - 200	48,3	49,0	50,4
200 - 300	50,8	51,3	52,3
300 - 400	52,2	52,6	53,3
400 - 500	53,3	53,1	53,7
500 - 600	53,5	53,3	54,6
600 - 700	53,3	53,9	54,8
700 - 800	52,9	53,5	54,8
800 - 900	52,9	53,6	54,8
900 - 1000	52,6	53,7	54,6
1000 - 1100	52,8	54,3	54,6
1100 - 1200	53,1	54,2	55,1
1200 - 1300	53,3	54,6	55,0
1300 - 1400	54,4	54,4	55,5
1400 - 1500	54,7	54,5	56,2
1500 - 1600	55,5	55,4	57,2
1600 - 1700	56,0	55,4	57,2
1700 - 1800	57,2	57,2	58,5
1800 - 1900	57,9	58,6	59,0
≥ 1900	59,0	59,3	60,4

Ao analisarmos a tabela 12, verificamos que a temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, nos anos de 2006, 2007, 2008, está dentro dos parâmetros normais de funcionamento.

No mês de Junho de 2006, o valor médio da temperatura do óleo da caixa de engrenagens é muito elevado. Verifica-se que este aumento é muito pronunciado para valores baixos de potência, tendo sido sinalizados vários alarmes relativos à elevada temperatura atingida pelo óleo da caixa de engrenagens.

Após análise dos *service reports* conclui-se que houve um problema com o motor que faz o arrefecimento do óleo e por isso a temperatura do óleo da caixa de engrenagens atingiu valores elevados [16]. A tabela 13 ilustra o reportado.

Tabela 13 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	Abr-06	Mai-06	Jun-06	Jul-06	Ago-06	Set-06
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	44,6	47,8	53,2	50,8	51,3	48,7
100 - 200	47,6	51,0	56,3	52,4	52,1	50,5
200 - 300	50,8	52,4	59,4	52,4	52,7	51,2
300 - 400	52,1	53,2	57,4	52,7	53,2	52,1
400 - 500	51,8	53,9	56,4	53,2	54,2	52,9
500 - 600	51,8	53,5	57,9	53,9	55,0	53,2
600 - 700	52,6	52,9	57,9	54,8	55,6	54,4
700 - 800	52,4	52,6	56,0	55,4	57,2	54,7
800 - 900	52,8	52,0	56,4	56,1	57,2	55,4
900 - 1000	52,2	51,9	55,4	56,4	57,6	55,2
1000 - 1100	53,0	51,7	57,1	57,1	57,9	55,6
1100 - 1200	54,5	51,9	56,4	57,3	58,3	55,3
1200 - 1300	53,4	52,2	56,8	57,9	58,6	56,1
1300 - 1400	54,7	53,3	57,0	58,5	59,1	57,0
1400 - 1500	54,5	53,8	57,7	58,6	59,1	56,9
1500 - 1600	55,3	54,8	58,1	58,6	59,8	56,1
1600 - 1700	55,6	54,7	58,3	59,0	60,1	58,0
1700 - 1800	57,3	56,7	58,7	59,3	60,3	58,5
1800 - 1900	57,8	57,9	58,8	59,4	60,6	59,2
≥ 1900	59,3	60,7	59,6	59,6	61,0	60,9

Como se pode verificar, após a resolução do problema com o motor, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens voltou para os valores normais, o que significa que o mau funcionamento do motor estava na origem do aumento considerável da temperatura.

Em Fevereiro de 2008, são detectadas anomalias pela equipa de manutenção, apesar de não se ter verificado um aumento significativo do valor médio da temperatura do óleo da caixa de engrenagens. Neste caso, foi igualmente analisado o tempo de funcionamento em cada nível de potência, tendo-se verificado que para níveis de potência e tempos de funcionamento similares, a temperatura do óleo da caixa de engrenagens estava dentro dos parâmetros normais.

Em Outubro de 2008 a caixa de engrenagens foi substituída, devido à existência de fissuras no corpo da caixa [16].

Analisando a tabela 14, verificamos que a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens sofre um aumento significativo, especialmente para baixos níveis de potência, a partir do mês de Agosto de 2008. Neste caso, foi igualmente analisado o tempo de funcionamento em cada nível de potência, tendo-se verificado que os tempos de funcionamento eram muito reduzidos para que a temperatura do óleo da

caixa de engrenagens pudesse atingir valores tão elevados, significando que algo de errado estava a acontecer na caixa de engrenagens, desde essa altura.

Tabela 14 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	Jun-08	Jul-08	Ago-08	Set-08	Out-08	Nov-08
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	48,1	48,1	51,2	52,5	47,4	49,1
100 - 200	50,3	51,3	52,1	52,8	50,4	52,7
200 - 300	52,4	53,0	52,8	52,2	52,6	54,9
300 - 400	53,5	53,6	52,9	51,8	54,2	56,5
400 - 500	53,6	53,4	53,2	52,9	54,6	58,7
500 - 600	53,5	52,6	53,1	53,5	55,9	57,8
600 - 700	53,0	52,1	53,6	55,0	57,0	58,4
700 - 800	52,9	52,4	53,9	56,1	56,7	58,7
800 - 900	53,2	52,7	54,4	56,9	58,1	58,3
900 - 1000	53,7	53,4	55,5	58,6	58,1	57,9
1000 - 1100	53,5	53,8	56,1	58,6	59,1	59,2
1100 - 1200	54,3	55,2	57,1	59,1	57,2	58,9
1200 - 1300	54,5	55,6	57,6	60,0	58,1	59,3
1300 - 1400	54,6	56,0	57,9	60,2	58,6	57,9
1400 - 1500	55,8	56,5	57,5	60,5	59,0	59,1
1500 - 1600	56,0	58,0	58,4	60,7	58,8	59,4
1600 - 1700	56,1	58,2	58,7	60,9	59,5	59,2
1700 - 1800	57,7	59,1	59,7	60,8	59,9	60,7
1800 - 1900	57,5	60,2	60,6	61,3	60,6	61,4
≥ 1900	60,0	61,7	60,4	62,4	63,3	63,6

O resultado das análises efectuadas às grandezas, nomeadamente a temperatura do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, do aerogerador 3, encontram-se no Anexo B.

### Aerogerador 5

O aerogerador 5 necessitou de substituição da caixa de engrenagens no final de Julho de 2007. A caixa de engrenagens original apresentava fissuras no corpo da caixa, que originavam fugas de óleo [16]. A tabela 15 apresenta a evolução da temperatura média anual do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens, para os anos de 2006, 2007, 2008, por escalão de potência.

Tabela 15 - Temperatura média anual do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 5.

Aerogerador 5	2006	2007	2008
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,5	44,1	44,4
100 - 200	48,0	46,9	48,2
200 - 300	50,3	49,8	51,5
300 - 400	51,9	51,7	52,8
400 - 500	52,8	52,7	53,4
500 - 600	52,9	53,4	53,9
600 - 700	53,4	53,1	54,7
700 - 800	53,2	53,1	54,7
800 - 900	52,9	52,9	54,6
900 - 1000	52,8	53,0	54,2
1000 - 1100	52,7	53,2	54,2
1100 - 1200	53,3	53,8	54,0
1200 - 1300	53,5	53,8	54,6
1300 - 1400	54,0	54,4	54,8
1400 - 1500	55,5	54,9	55,4
1500 - 1600	55,6	55,3	55,7
1600 - 1700	55,9	55,7	56,8
1700 - 1800	56,8	56,0	57,6
1800 - 1900	57,8	57,2	58,0
≥ 1900	58,7	58,5	59,7

Verifica-se que, durante o ano de 2006, o valor médio da temperatura do óleo da caixa de engrenagens esteve sempre dentro dos valores considerados aceitáveis. Os *service reports* de 2006 não reportam nenhuma avaria na caixa de engrenagens.

Em Janeiro de 2007 foi feita a manutenção anual programada, não tendo sido registado nada de anormal na caixa de engrenagens. No entanto, em Agosto, durante a operação de manutenção semestral programada, o aerogerador foi desligado e foi dada ordem para substituir a caixa de engrenagens, por existirem fissuras no corpo da caixa [16].

Em Julho de 2007, o valor médio da temperatura do óleo da caixa de engrenagens é ligeiramente mais elevado, no entanto, não justificava a existência de problemas na

caixa de engrenagens, como está ilustrado na tabela 16. Quando é igualmente considerado o tempo de funcionamento em cada nível de potência, verifica-se que para níveis de potência e para tempos de funcionamento similares, a temperatura do óleo da caixa de engrenagens estava dentro dos parâmetros normais.

De acordo com a sua tese de doutoramento, *Roque Brandão* [16], a justificação que se encontra para o seu método não ter detectado, com clareza, a avaria é de que as fissuras detectadas pela equipa de manutenção seriam muito recentes ou ainda muito pequenas, pelo que por precaução se decidiu fazer a substituição do equipamento, não esperando que o problema se agravasse e se tivesse que fazer a operação durante os meses de Inverno.

Tabela 16 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens, por escalão de potência, no aerogerador 5.

Aerogerador 5	Mai-07	Jun-07	Jul-07	Ago-07	Set-07	Out-07
Potência (kW)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)	AvgTemp3 (°C)
0 - 100	45,5	45,3	46,8	46,1	46,2	43,9
100 - 200	48,7	49,1	49,9	48,7	48,4	46,7
200 - 300	50,8	51,0	52,5	50,8	50,5	49,5
300 - 400	52,2	52,4	53,5	51,7	52,2	51,7
400 - 500	53,4	53,3	53,3	51,9	52,9	52,7
500 - 600	53,7	53,2	53,0	52,3	53,3	53,7
600 - 700	53,5	52,8	52,2	52,9	53,0	53,1
700 - 800	53,1	52,3	51,7	52,9	51,9	53,4
800 - 900	52,7	52,7	52,0	52,6	51,9	53,0
900 - 1000	52,5	52,7	52,5	52,9	52,0	53,0
1000 - 1100	52,7	52,9	53,4	53,0	52,7	52,9
1100 - 1200	52,9	53,5	54,1	53,8	53,0	52,6
1200 - 1300	53,3	53,9	55,4	53,7	53,8	53,3
1300 - 1400	53,5	54,8	56,0	55,5	54,5	53,0
1400 - 1500	54,1	55,5	56,5	54,9	55,3	53,8
1500 - 1600	54,2	56,9	57,1	55,8	55,9	54,7
1600 - 1700	54,8	56,8	57,6	56,0	56,0	55,0
1700 - 1800	56,1	58,2	57,8	53,7	57,2	55,9
1800 - 1900	57,3	58,7	58,9	58,7	59,4	57,2
≥ 1900	58,5	60,2	59,4	57,9	59,2	58,2

O resultado das análises efectuadas às grandezas, nomeadamente a temperatura do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, do aerogerador 5, encontram-se no Anexo C.

## **4.5. Conclusões**

O resultado das análises efectuadas ao comportamento da caixa de engrenagens perante uma avaria demonstrou que é possível prevêê-las. A detecção precoce de falhas incipientes previne o acontecimento de falhas maiores, facultando informação precisa aos operadores e responsáveis pela manutenção sobre o estado de funcionamento do aerogerador. Esta informação é uma grande vantagem em termos técnicos e económicos, pois permite um escalonamento eficiente da manutenção e a adopção das estratégias de reparação mais conveniente.

Verificou-se que o aumento considerável da temperatura média do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens pode indiciar anomalias na mesma.

O aerogerador 10 não necessitou de substituição da caixa de engrenagens até ao final do ano de 2008, nem teve qualquer outra anomalia relacionada com a caixa de engrenagens.

O aerogerador 2 não necessitou de substituição da caixa de engrenagens até ao final do ano de 2008, no entanto, teve uma avaria relacionada com o mau funcionamento da bomba do óleo, em Março de 2006. O aumento considerável da temperatura média do óleo de lubrificação da caixa de engrenagens nos meses antecedentes demonstra que algo estranho estava a acontecer. Após a substituição do componente, a temperatura média do óleo voltou para valores normais, o que significa que o seu mau funcionamento estava na origem do aumento considerável da temperatura.

O aerogerador 11 necessitou de substituição da caixa de engrenagens em Dezembro de 2008. Como foi possível verificar, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens sobe bastante a partir de Abril de 2008, indiciando o mau funcionamento da caixa de engrenagens.

O aerogerador 3 necessitou de substituição da caixa de engrenagens em Outubro de 2008. Como se pode constatar, a partir do mês de Agosto de 2008, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens sofre um aumento significativo, o que indicia o mau funcionamento da caixa de engrenagens.

O aerogerador 5 necessitou de substituição da caixa de engrenagens no final de Julho de 2007. Neste caso, a temperatura média do óleo da caixa de engrenagens não sofreu alterações significativas. A justificação para a não detecção da anomalia prende-se com o facto de a equipa de manutenção ter detectado os indícios de avaria precocemente, e assim, optado pela sua substituição, não esperando o agravamento da anomalia.

O aumento do valor médio anual da temperatura do óleo da caixa de engrenagens foi outro fenómeno verificado. A sua explicação está relacionada com o desgaste dos componentes, que levam à perda de qualidade do óleo, provocando o comportamento anormal da caixa de engrenagens.

## 5. CONCLUSÃO



---

A energia eólica surgiu, nos últimos anos, como uma das fontes de energia alternativa com maior viabilidade de exploração, procurando reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e a diminuição das emissões de poluentes na atmosfera. Esta é considerada como uma energia limpa em termos ambientais, não tendo custos directos de produção, isto é, custos com o combustível.

A evolução desta tecnologia tem sido significativa, verificando-se uma tendência na duplicação da capacidade instalada global em cada três anos, com valores efectivos de 238351 MW em 2011. No final de 2011, Portugal ocupava o décimo lugar a nível mundial, com cerca de 4083 MW de potência eólica instalada e ligada à rede.

Apesar do grande desenvolvimento verificado, a maioria dos componentes e subsistemas das turbinas eólicas necessitam de substituições ou reparações significativas, antes do tempo de vida útil das mesmas ser alcançado. Apesar da indústria eólica ter uma experiência de trinta anos, as taxas de avarias ainda se apresentam elevadas. Os tempos de paragem associados às avarias e à sua reparação provocam prejuízos não desprezíveis. As falhas que inicialmente não são detectadas podem transformar-se em falhas catastróficas. Estas falhas podem estar na origem da substituição de todo o subsistema, traduzindo-se num longo período de indisponibilidade. De modo a evitar este tipo de falhas e a permitir reduzir os custos durante o ciclo de vida das turbinas eólicas, existe a necessidade de otimizar as estratégias de manutenção, de forma a maximizar o retorno do investimento nos parques eólicos.

Os aerogeradores mais recentes possuem sistemas de monitorização que permitem monitorizar todos os equipamentos constituintes da máquina, possibilitando um acompanhamento mais próximo do estado real de funcionamento dos equipamentos que constituem uma turbina eólica.

Apesar de ser importante monitorizar o estado de todos os equipamentos que constituem uma turbina eólica, alguns componentes críticos foram identificados. A caixa de engrenagens, o gerador e as pás são esses componentes, dado que originam os maiores tempos de indisponibilidade por falha, quando comparados com os outros componentes.

A monitorização *online* destes equipamentos permite que se detecte precocemente as pequenas falhas, de forma a evitar que se transformem em falhas maiores. A informação obtida pelos sensores instalados nos equipamentos permite aferir o real estado de funcionamento dos mesmos, através da simples análise das grandezas.

A escolha das grandezas analisadas na detecção de avarias, temperatura do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento em cada nível de potência, revelou-

se acertada, uma vez que estas grandezas traduzem com precisão o estado real de funcionamento na caixa de engrenagens. As anomalias relacionadas com a caixa de engrenagens ou com algum dos seus subsistemas (bomba do óleo, motor de refrigeração do óleo) reflectiram sempre um aumento na temperatura média do óleo da caixa de engrenagens, assim como uma diminuição no nível de potência.

Este trabalho de investigação permitiu fazer uma análise do comportamento de algumas grandezas, nomeadamente a temperatura da caixa de engrenagens, com o objectivo de detecção de avarias, usando apenas a informação disponibilizada pelo sistema *SCADA* do parque. Este facto é muito relevante uma vez que evita a instalação de equipamentos adicionais nas turbinas eólicas. Dado que as grandezas armazenadas pelo sistema *SCADA* estão imediatamente disponíveis, existe a possibilidade de se fazer uma análise *online*.

## **BIBLIOGRAFIA**



- 
- [1] REN21, "Renewables 2012 Global Status Report," Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, 2012.
  - [2] Castro, Rui M. G., Introdução à Energia Eólica, Energias Renováveis e Produção Descentralizada, edição 4, IST – Instituto Superior Técnico. Lisboa.
  - [3] Global Wind 2011 Report. Link: [http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2011\\_lowres.pdf](http://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2011_lowres.pdf)
  - [4] A Energia Eólica em Portugal - 2011. Link: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/EnergiaEolica/A%20Energia%20E%C3%B3lica%20em%20Portugal%20-%202011.pdf>
  - [5] INEGI & APREN, "Parques eólicos em Portugal - Dezembro de 2011," INEGI, Porto, 2012.
  - [6] P. Europeu and C. d. U. Europeia, "2001/77/CE," vol. 2001/77/CE, ed. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, 2001.
  - [7] REN, "Dados Técnicos 2011," REN, Lisboa, 2012.
  - [8] E. GmbH. (2012, 20 de Novembro). ENERCON Energy for the World. Link: [www.enercon.de](http://www.enercon.de)
  - [9] Vestas. (2012, 20 de Novembro). Wind. It means the world to us. Link: [www.vestas.com](http://www.vestas.com)
  - [10] J. G. Clark, "Wind energy in America: A history - Righter,RW," Environmental History, vol. 2, pp. 380-381, Jul 1997.
  - [11] S. Krohn, "Danish Wind Turbines: An Industrial Success Story," Danish Wind Industry Association, København, February 2002.
  - [12] CIGRE, "Modeling New Forms of Generation and Storage," CIGRE TF 38.01.10, November 2000.
  - [13] R. Lyra, "Potencialidades da energia eólica em Alagoas", 2010.
  - [14] Nordex. (2012, 11 de Fevereiro). NORDEX We've got the power. Link: [www.nordex-online.com](http://www.nordex-online.com)
  - [15] Castro, Rui M. G., Equipamento Eléctrico dos Geradores Eólicos, Energias Renováveis e Produção Descentralizada, edição 1.1, IST - Instituto Superior Técnico. Lisboa.
  - [16] Brandão, R. F. M., "Assinatura Digital de Aero geradores," Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade

do Porto, Porto, 2011.

- [17] P. Caselitz, "Application of Condition Monitoring Systems in Wind Energy Converters," in EWEC, Dublin, 1997, pp. 579-582.
- [18] D. McMillan and G. W. Ault, "Condition monitoring benefit for onshore wind turbines: sensitivity to operational parameters," IET Renewable Power Generation, vol. 2, pp. 60-72, Mar 2008.
- [19] R. W. Hyers, et al., "Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines," Energy Materials: Materials Science and Engineering for Energy Systems, vol. 1, pp. 187-203, 2006.
- [20] A. Kusiak and W. Li, "The prediction and diagnosis of wind turbine faults," Renewable Energy, vol. 36, pp. 16-23, 2011.
- [21] NP EN 13306:2007 - Terminologia da Manutenção, 2007.
- [22] L. A. Ferreira, Uma Introdução à Manutenção, 1ª ed. Porto: Publindústria, 1998.
- [23] J. Ribrant, "Reliability performance and maintenance - A survey of failures in wind power systems," Master Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, 2005-2006.
- [24] Santos, B. A. d. O. (2012, 11 de Fevereiro). Sistemas de supervisão SCADA, EMS e DMS. Link: [http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom\\_att\\_2=simple\\_viewer&metadata\\_request=false&pid=145037](http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=145037)
- [25] D. W. I. Association. (2002, 8 March). Guided Tour on Wind Energy. Link: <http://www.windpower.org/>
- [26] J. Nilsson and L. Bertling, "Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems - Life cycle cost analysis for two case studies," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, pp. 223-229, Mar 2007.
- [27] R. F. M. Brandão, et al., "Forced Outage Time Analysis of a Portuguese Wind Farm," in 44th International Universities' Power Engineering Conference, Glasgow, Scotland, 2009.
- [28] J. Ribrant and L. Bertling, "Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005," 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vols 1-10, pp. 3896-3903, 2007.
- [29] J. A. Andrawus, "Maintenance Optimisation for Wind Turbines," PhD Thesis, The

---

Robert Gordon University Aberdeen, Aberdeen, 2008.

- [30] P. J. Tavner, et al., "Study of Effects of Weather & Location on Wind Turbine Failure Rates," in European Wind Energy Conference (EWEC 2010), Warsaw, Poland, 2010.
- [31] S. Faulstich, et al., "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment," Wind Energy, 2010.
- [32] P. Caselitz and J. Giebhardt, "Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters," Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme, vol. 127, pp. 253-261, May 2005.
- [33] I.-I. E. Commission, "IEC 61400-24 Ed.1: Wind turbine generator systems - Lightning protection," vol. IEC 61400-24 Ed.1, ed: IEC, 2002.
- [34] J. C. Marín, et al., "Study of fatigue damage in wind turbine blades," Engineering Failure Analysis, vol. 16, pp. 656-668, 2009.
- [35] R. Kithil, "Case Study of Lightning Damage to Wind Turbine Blade," National Lightning Safety Institute (NLSI), June 2008.
- [36] R. F. M. Brandão, et al., " Forecast of Faults in a Wind Turbine Gearbox," in Elektro 2012.
- [37] L.D. Gudkov, "The Great Soviet Encyclopedia", 3rd Edition (1970-1979). The Gale Group, Inc., 2010
- [38] J. Helsen, et al., " The influence of flexibility within multibody modeling of multi-megawatt wind turbine gearboxes," Proceedings of ISMA 2008: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Vols 1-7, pp. 2045-2072, 2009.
- [39] W. Musial, et al., "Improving Wind Turbine Gearbox Reliability," presented at the EWEC- European Wind Energy Conference, Milan, 2007.
- [40] J. Puigcorbe and A. de-Beaumont. (2013, 11 de Janeiro) Wind Turbine Gearbox Reliability: The impact of rotor support. Renewable Energy World Magazine. Link: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/06/wind-turbine-gearbox-reliability>
- [41] T. Lester, "Solving the Gearbox Reliability Problem," Lestran Engineering, Fort Worth, Texas, USA, 2010.
- [42] S. Polak, "Gearbox and gear system problems," Gear Technology - Gaining a Competitive Edge, vol. 2000, pp. 65-72, 2000.
- [43] Yanhui Feng, et al., "Use of SCADA and CMS Signals for Failure Detection and

- Diagnosis of a Wind Turbine Gearbox," in EWEA 2011, Brussels, Belgium, 2011.
- [44] ABB. (2013, 6 March). Products & Services for Wind Power Generators. Link: <http://www.abb.com>
- [45] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.
- [46] E. Al-Ahmar, et al., "Wind Energy Conversion Systems Fault Diagnosis Using Wavelet Analysis," *International Review of Electrical Engineering-IREE*, vol. 3, pp. 646-652, Jul-Aug 2008.
- [47] C. Earp and B. Higgs, "Raising Generator Reliability", *Wind Systems Magazine*, pp. 64-71, 2010.
- [48] I.-I. E. Commission, "IEC 61400-12 Ed.1: Wind turbine generator systems - Wind turbine power performance testing," vol. IEC 61400-12 Ed.1, ed: IEC, 1998.
- [49] Y. Amirat, et al., "Condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems: A review," *IEEE Iemdc 2007: Proceedings of the International Electric Machines and Drives Conference*, Vols 1 and 2, pp. 1434-1439, 2007.
- [50] R. M. Brandão, et al., "Wind Energy Technology," in *Renewable Energy*, T. J. Hammons, Ed. In-Teh, Vukovar, 2009, pp. 505-530.
- [51] Mukund, R.P. (1999). *Wind and Solar Power Systems*, CRP Press, ISBN 0-8493-1605-7, United States of America.
- [52] E. C. Fitch. (2002, 2 Nov). Temperature Stability of Lubricants and Hydraulic Fluids. *Machinery Lubrication*. Link: <http://www.machinerylubrication.com/Read/367/temperature-stability>

## **ANEXOS**



## **ANEXO A**

### **ANÁLISE DO AEROGERADOR 11**



Tabela 17 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 11.

Aerogerador 11	Jan-06		Fev-06		Mar-06		Abr-06		Mai-06		Jun-06		Jul-06		Ago-06		Set-06		Out-06		Nov-06		Dez-06	
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)
0 - 100	45,1	651,0	44,9	499,0	45,4	516,0	45,5	341,0	47,9	548,0	47,4	704,0	47,6	562,0	49,3	447,0	47,2	488,0	45,4	393,0	45,4	316,0	44,6	405,0
100 - 200	47,2	487,0	47,8	428,0	48,1	408,0	48,1	274,0	50,1	500,0	49,9	512,0	50,3	469,0	51,0	417,0	50,1	496,0	48,2	289,0	47,9	287,0	47,2	317,0
200 - 300	49,5	335,0	50,0	308,0	50,7	323,0	51,0	203,0	51,6	340,0	51,8	353,0	52,1	383,0	52,4	319,0	51,3	479,0	50,6	239,0	50,2	262,0	49,3	269,0
300 - 400	51,5	220,0	51,8	216,0	52,5	320,0	52,8	143,0	53,2	300,0	52,4	302,0	52,8	251,0	52,9	338,0	51,9	359,0	51,0	236,0	51,4	312,0	50,6	209,0
400 - 500	52,6	197,0	53,0	181,0	53,3	280,0	53,4	95,0	53,7	249,0	53,1	248,0	53,4	260,0	53,4	285,0	52,2	277,0	51,4	235,0	52,1	304,0	52,4	202,0
500 - 600	53,4	166,0	53,4	193,0	53,7	203,0	53,6	70,0	53,8	178,0	53,3	176,0	54,2	205,0	54,1	258,0	52,3	206,0	51,3	173,0	52,6	287,0	52,7	215,0
600 - 700	53,6	133,0	53,6	167,0	53,5	223,0	53,4	71,0	53,5	189,0	53,2	142,0	53,9	215,0	54,3	252,0	52,5	149,0	51,3	187,0	52,5	202,0	53,0	229,0
700 - 800	53,6	128,0	52,9	155,0	53,4	173,0	52,5	58,0	53,0	177,0	53,1	113,0	54,1	189,0	54,8	253,0	52,6	162,0	51,4	155,0	52,0	192,0	52,2	206,0
800 - 900	53,0	116,0	53,4	131,0	53,2	133,0	52,7	36,0	53,2	162,0	53,3	121,0	54,6	139,0	55,2	224,0	53,3	141,0	51,5	158,0	52,4	165,0	52,2	186,0
900 - 1000	52,4	104,0	52,9	115,0	52,8	145,0	53,2	34,0	52,9	183,0	54,0	124,0	55,3	112,0	55,6	212,0	54,2	133,0	52,1	173,0	52,1	156,0	52,3	174,0
1000 - 1100	52,0	99,0	53,0	113,0	52,5	128,0	52,7	34,0	53,4	128,0	54,0	84,0	55,7	113,0	56,0	154,0	54,7	148,0	52,3	151,0	52,7	140,0	52,2	169,0
1100 - 1200	51,9	101,0	52,5	108,0	52,4	125,0	53,0	20,0	53,4	142,0	55,0	97,0	55,9	74,0	56,7	131,0	55,0	139,0	53,1	126,0	53,0	143,0	52,5	146,0
1200 - 1300	51,9	83,0	52,4	106,0	52,6	99,0	53,3	18,0	53,9	105,0	55,2	86,0	56,2	77,0	56,7	124,0	56,0	125,0	54,0	137,0	54,1	121,0	52,7	138,0
1300 - 1400	52,1	80,0	52,2	85,0	53,1	90,0	54,4	18,0	53,9	96,0	56,4	82,0	56,9	101,0	57,4	112,0	56,1	101,0	54,5	135,0	54,3	119,0	53,2	145,0
1400 - 1500	52,6	72,0	52,3	78,0	53,2	99,0	54,5	14,0	54,4	89,0	56,4	86,0	56,6	83,0	58,0	90,0	56,4	95,0	55,1	130,0	55,3	95,0	53,4	110,0
1500 - 1600	52,5	72,0	53,2	87,0	53,7	90,0	54,9	19,0	54,8	89,0	57,0	75,0	57,8	75,0	58,0	72,0	56,9	78,0	56,1	134,0	55,8	118,0	53,9	81,0
1600 - 1700	53,3	69,0	53,5	82,0	54,6	86,0	55,6	18,0	56,3	64,0	57,2	65,0	58,3	92,0	57,9	77,0	57,0	65,0	56,5	125,0	56,3	85,0	54,9	102,0
1700 - 1800	53,7	73,0	53,8	82,0	56,0	107,0	56,7	25,0	56,6	51,0	57,3	74,0	57,7	82,0	58,5	58,0	57,0	57,0	57,1	126,0	56,6	100,0	55,1	89,0
1800 - 1900	55,2	170,0	54,4	81,0	57,0	164,0	56,8	23,0	57,4	45,0	57,8	71,0	58,7	131,0	58,8	75,0	57,7	64,0	57,8	186,0	57,4	96,0	57,0	81,0
≥ 1900	55,5	192,0	55,9	196,0	58,0	406,0	57,9	49,0	59,8	146,0	58,7	218,0	58,6	373,0	59,5	277,0	58,4	88,0	58,1	402,0	58,3	223,0	57,4	203,0
		3548,0		3411,0		4118,0		1563,0		3781,0		3733,0		3986,0		4175,0		3850,0		3890,0		3723,0		3676,0

Tabela 18 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 11.

Aerogerador 11	Jan-07		Fev-07		Mar-07		Abr-07		Mai-07		Jun-07		Jul-07		Ago-07		Set-07		Out-07		Nov-07		Dez-07	
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)
0 - 100	44,2	616,0	44,1	279,0	45,6	431,0	n.d.		46,0	543,0	46,3	605,0	48,4	363,0	48,5	484,0	49,9	716,0	48,9	879,0	46,6	576,0	44,6	413,0
100 - 200	46,6	495,0	47,6	220,0	48,6	457,0	n.d.		49,2	488,0	49,6	500,0	50,9	315,0	51,3	384,0	52,5	559,0	52,0	612,0	49,1	467,0	47,5	368,0
200 - 300	49,3	292,0	49,9	256,0	50,2	379,0	n.d.		51,2	411,0	51,8	400,0	52,4	295,0	53,0	349,0	53,1	417,0	53,0	430,0	50,6	337,0	49,7	253,0
300 - 400	51,3	254,0	51,3	175,0	52,7	350,0	n.d.		52,8	359,0	52,9	331,0	53,2	222,0	53,1	332,0	53,1	268,0	52,8	366,0	52,1	287,0	51,5	180,0
400 - 500	52,5	195,0	53,3	179,0	53,6	315,0	n.d.		53,4	310,0	53,6	246,0	52,8	225,0	52,8	249,0	52,6	252,0	52,8	247,0	52,9	242,0	53,7	153,0
500 - 600	53,6	157,0	54,3	161,0	54,7	238,0	n.d.		53,4	245,0	53,3	200,0	52,3	228,0	52,4	245,0	52,2	170,0	52,8	188,0	53,4	212,0	54,0	133,0
600 - 700	53,7	157,0	54,6	175,0	54,7	186,0	n.d.		53,6	178,0	53,1	184,0	52,1	188,0	52,3	206,0	52,6	168,0	53,4	158,0	53,8	166,0	55,2	100,0
700 - 800	53,9	126,0	55,5	175,0	54,8	181,0	n.d.		53,5	146,0	52,8	176,0	52,4	168,0	52,6	150,0	53,2	160,0	53,5	131,0	53,5	110,0	55,1	91,0
800 - 900	54,3	123,0	54,9	178,0	54,8	165,0	n.d.		53,1	164,0	52,7	181,0	52,4	188,0	52,9	140,0	53,8	107,0	53,9	120,0	53,1	105,0	54,7	99,0
900 - 1000	53,5	97,0	54,7	127,0	54,5	131,0	n.d.		53,0	158,0	53,2	150,0	52,8	179,0	53,3	139,0	54,1	95,0	54,3	112,0	53,6	83,0	54,2	85,0
1000 - 1100	54,5	86,0	54,7	140,0	54,4	118,0	n.d.		53,3	163,0	53,3	111,0	53,4	172,0	54,2	119,0	55,0	79,0	55,1	117,0	54,1	64,0	53,8	78,0
1100 - 1200	53,8	79,0	54,4	100,0	53,8	110,0	n.d.		53,8	139,0	53,9	103,0	53,8	140,0	54,5	99,0	56,0	77,0	55,8	79,0	54,5	57,0	53,9	67,0
1200 - 1300	54,2	69,0	54,0	101,0	54,6	90,0	n.d.		53,6	133,0	54,6	100,0	54,5	123,0	54,9	127,0	56,7	84,0	56,0	46,0	54,0	52,0	54,3	73,0
1300 - 1400	54,3	45,0	54,3	104,0	54,5	95,0	n.d.		54,1	102,0	55,3	93,0	55,7	125,0	55,8	97,0	57,3	58,0	56,7	39,0	55,1	33,0	54,3	66,0
1400 - 1500	52,8	48,0	54,9	113,0	54,1	94,0	n.d.		54,7	79,0	56,2	56,0	56,5	122,0	55,8	99,0	57,9	59,0	57,5	39,0	55,0	37,0	55,1	56,0
1500 - 1600	54,6	45,0	55,4	111,0	55,0	92,0	n.d.		55,4	56,0	57,2	76,0	57,1	136,0	57,6	64,0	58,5	60,0	58,3	26,0	55,4	33,0	55,5	56,0
1600 - 1700	54,8	46,0	55,6	94,0	55,1	91,0	n.d.		56,1	52,0	58,1	50,0	57,9	111,0	57,6	67,0	58,3	51,0	59,4	12,0	56,1	53,0	55,5	67,0
1700 - 1800	54,8	40,0	56,5	117,0	55,4	113,0	n.d.		56,6	39,0	58,8	41,0	58,6	118,0	58,6	73,0	59,4	28,0	58,1	20,0	56,4	60,0	55,8	84,0
1800 - 1900	55,7	63,0	57,3	111,0	56,2	130,0	n.d.		57,3	51,0	59,0	43,0	59,7	104,0	59,0	88,0	59,5	48,0	60,3	29,0	56,5	27,0	56,7	110,0
≥ 1900	56,7	199,0	59,3	338,0	58,5	303,0	n.d.		59,0	84,0	60,8	120,0	60,5	450,0	59,6	323,0	59,9	61,0	60,8	24,0	57,6	31,0	59,5	500,0
		3232,0		3254,0		4069,0		0,0		3900,0		3766,0		3972,0		3834,0		3517,0		3674,0		3032,0		3032,0

Tabela 19 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 11.

Aerogerador 11	Jan-08		Fev-08		Mar-08		Abr-08		Mai-08		Jun-08		Jul-08		Ago-08		Set-08		Out-08		Nov-08		Dez-08			
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	
0 - 100	44,8	524,0	43,5	516,0	45,2	362,0	46,1	444,0	46,5	562,0	49,9	361,0	50,1	373,0	49,9	299,0	48,6	349,0	49,4	352,0	47,6	422,0	52,1	58,0		
100 - 200	47,7	434,0	47,6	243,0	48,4	334,0	49,9	338,0	50,8	551,0	52,9	429,0	52,5	441,0	52,6	269,0	52,5	224,0	52,2	297,0	52,4	278,0	52,7	126,0		
200 - 300	50,5	364,0	50,7	170,0	51,1	244,0	52,7	294,0	53,4	499,0	54,1	369,0	54,7	414,0	54,4	295,0	54,5	196,0	54,5	233,0	55,1	313,0	54,8	127,0		
300 - 400	52,5	306,0	52,9	111,0	53,3	231,0	54,4	262,0	55,2	401,0	55,7	363,0	55,5	295,0	55,2	261,0	56,4	126,0	56,3	135,0	57,0	326,0	56,7	138,0		
400 - 500	53,6	247,0	53,3	128,0	54,7	224,0	56,2	198,0	57,1	333,0	57,2	326,0	56,7	264,0	55,9	247,0	58,6	101,0	56,5	119,0	58,8	272,0	57,8	133,0		
500 - 600	54,6	223,0	54,1	121,0	55,4	195,0	58,0	157,0	58,4	261,0	57,7	287,0	58,0	260,0	57,0	244,0	59,3	120,0	57,7	99,0	59,3	233,0	59,1	121,0		
600 - 700	54,5	239,0	53,9	129,0	55,6	188,0	58,4	151,0	59,1	215,0	58,1	252,0	58,0	246,0	56,9	196,0	58,1	86,0	58,2	80,0	59,6	192,0	59,5	89,0		
700 - 800	54,8	176,0	54,6	123,0	55,4	174,0	58,3	127,0	59,5	150,0	58,6	195,0	58,4	213,0	57,2	178,0	58,1	78,0	59,1	76,0	59,8	155,0	60,8	105,0		
800 - 900	54,3	113,0	54,6	126,0	54,5	176,0	58,1	116,0	60,0	125,0	58,5	172,0	58,3	213,0	58,4	178,0	57,7	70,0	59,2	67,0	59,7	149,0	60,2	101,0		
900 - 1000	53,9	92,0	53,9	138,0	54,1	136,0	58,9	108,0	59,8	105,0	58,7	171,0	58,7	205,0	58,6	176,0	58,3	65,0	58,3	61,0	59,5	110,0	60,3	108,0		
1000 - 1100	54,2	85,0	53,7	111,0	54,3	154,0	58,6	124,0	60,3	84,0	59,1	130,0	58,8	146,0	59,1	170,0	58,4	48,0	59,0	54,0	59,9	112,0	59,9	96,0		
1100 - 1200	53,7	100,0	53,5	127,0	54,0	123,0	59,1	119,0	59,5	105,0	59,8	101,0	58,8	131,0	60,2	153,0	59,1	41,0	59,5	52,0	59,1	103,0	59,3	97,0		
1200 - 1300	54,1	95,0	53,7	138,0	53,9	125,0	58,6	138,0	59,7	74,0	60,4	75,0	59,6	96,0	60,9	153,0	59,5	34,0	60,3	39,0	59,7	92,0	59,5	85,0		
1300 - 1400	54,0	89,0	54,3	132,0	53,8	112,0	59,2	111,0	59,0	54,0	61,0	83,0	60,1	68,0	61,8	173,0	60,5	27,0	59,5	42,0	59,4	89,0	59,1	58,0		
1400 - 1500	53,8	73,0	54,8	133,0	53,9	94,0	58,8	130,0	59,1	52,0	61,7	70,0	61,1	53,0	63,1	155,0	60,0	19,0	60,1	48,0	59,3	70,0	59,0	66,0		
1500 - 1600	54,5	69,0	55,3	130,0	55,2	74,0	59,9	129,0	59,7	55,0	61,9	74,0	61,3	42,0	63,9	165,0	60,5	15,0	61,1	28,0	59,9	59,0	59,5	58,0		
1600 - 1700	54,9	49,0	56,3	142,0	55,6	98,0	60,7	148,0	59,7	46,0	63,5	56,0	63,8	41,0	64,2	161,0	62,9	13,0	61,6	42,0	60,3	70,0	60,0	63,0		
1700 - 1800	56,2	82,0	56,9	169,0	56,7	110,0	61,8	152,0	60,2	44,0	63,6	47,0	63,9	47,0	65,9	119,0	63,2	19,0	61,9	54,0	60,6	53,0	60,6	79,0		
1800 - 1900	57,7	128,0	57,5	204,0	57,7	194,0	62,1	190,0	60,8	41,0	64,5	37,0	65,5	65,0	66,8	121,0	64,5	21,0	63,0	53,0	61,8	76,0	62,9	95,0		
≥ 1900	59,1	199,0	59,4	546,0	58,9	548,0	63,1	329,0	62,0	25,0	66,5	92,0	68,0	288,0	69,4	448,0	68,1	58,0	64,2	165,0	65,0	188,0	64,2	126,0		
		3687,0		3637,0		3896,0		3765,0		3782,0		3690,0		3901,0		4161,0		1710,0		2096,0		3362,0			1929,0	

## **ANEXO B**

### **ANÁLISE DO AEROGERADOR 3**



Tabela 20 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	Jan-06		Fev-06		Mar-06		Abr-06		Mai-06		Jun-06		Jul-06		Ago-06		Set-06		Out-06		Nov-06		Dez-06	
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)
0 - 100	45,2	652,0	45,2	590,0	45,2	513,0	44,6	416,0	47,8	647,0	53,2	803,0	50,8	628,0	51,3	561,0	48,7	592,0	44,7	340,0	45,1	222,0	43,7	386,0
100 - 200	47,9	409,0	48,0	426,0	48,2	377,0	47,6	275,0	51,0	462,0	56,3	487,0	52,4	362,0	52,1	465,0	50,5	509,0	48,4	247,0	47,6	278,0	46,3	298,0
200 - 300	50,1	261,0	50,7	301,0	50,7	286,0	50,8	116,0	52,4	428,0	59,4	329,0	52,4	323,0	52,7	456,0	51,2	328,0	49,6	226,0	49,4	267,0	48,8	283,0
300 - 400	52,1	219,0	52,3	261,0	52,8	225,0	52,1	71,0	53,2	346,0	57,4	267,0	52,7	301,0	53,2	427,0	52,1	252,0	51,4	221,0	50,4	224,0	50,0	233,0
400 - 500	53,4	168,0	53,6	222,0	53,7	207,0	51,8	55,0	53,9	303,0	56,4	175,0	53,2	289,0	54,2	340,0	52,9	231,0	51,5	177,0	51,5	178,0	51,4	203,0
500 - 600	53,6	151,0	53,4	177,0	53,7	176,0	51,8	27,0	53,5	246,0	57,9	181,0	53,9	259,0	55,0	309,0	53,2	207,0	51,8	171,0	51,9	202,0	52,3	191,0
600 - 700	53,8	135,0	53,4	150,0	53,2	135,0	52,6	48,0	52,9	234,0	57,9	153,0	54,8	195,0	55,6	212,0	54,4	197,0	51,3	145,0	51,8	180,0	52,4	147,0
700 - 800	53,0	100,0	53,2	135,0	52,8	126,0	52,4	47,0	52,6	196,0	56,0	105,0	55,4	184,0	57,2	187,0	54,7	205,0	51,6	134,0	51,8	177,0	52,3	152,0
800 - 900	53,0	103,0	53,0	144,0	52,6	95,0	52,8	31,0	52,0	164,0	56,4	116,0	56,1	189,0	57,2	147,0	55,4	151,0	51,6	154,0	51,5	139,0	52,2	124,0
900 - 1000	52,7	125,0	52,8	142,0	52,5	89,0	52,2	29,0	51,9	143,0	55,4	99,0	56,4	150,0	57,6	114,0	55,2	125,0	52,0	135,0	52,2	148,0	52,1	130,0
1000 - 1100	52,2	109,0	52,8	107,0	52,5	86,0	53,0	17,0	51,7	92,0	57,1	82,0	57,1	134,0	57,9	106,0	55,6	72,0	52,7	98,0	52,7	142,0	52,2	115,0
1100 - 1200	52,2	91,0	52,3	87,0	52,4	93,0	54,5	20,0	51,9	79,0	56,4	85,0	57,3	138,0	58,3	108,0	55,3	74,0	53,4	111,0	52,8	100,0	52,1	114,0
1200 - 1300	52,2	117,0	52,2	80,0	52,6	80,0	53,4	24,0	52,2	72,0	56,8	72,0	57,9	105,0	58,6	75,0	56,1	53,0	54,0	109,0	53,2	106,0	52,5	104,0
1300 - 1400	52,6	90,0	52,4	75,0	53,3	75,0	54,7	22,0	53,3	54,0	57,0	75,0	58,5	96,0	59,1	83,0	57,0	48,0	54,7	104,0	54,1	98,0	52,9	105,0
1400 - 1500	52,9	97,0	52,5	63,0	53,4	92,0	54,5	30,0	53,8	59,0	57,7	61,0	58,6	105,0	59,1	74,0	56,9	53,0	55,5	112,0	54,9	105,0	53,4	86,0
1500 - 1600	53,1	82,0	52,8	73,0	54,0	117,0	55,3	23,0	54,8	51,0	58,1	73,0	58,6	95,0	59,8	83,0	56,1	43,0	55,8	110,0	55,7	116,0	53,7	88,0
1600 - 1700	53,9	82,0	53,6	81,0	54,7	113,0	55,6	28,0	54,7	30,0	58,3	74,0	59,0	79,0	60,1	54,0	58,0	50,0	56,3	106,0	56,5	85,0	54,4	84,0
1700 - 1800	54,7	91,0	54,0	84,0	55,8	141,0	57,3	33,0	56,7	36,0	58,7	86,0	59,3	84,0	60,3	61,0	58,5	45,0	57,0	122,0	57,3	107,0	55,9	84,0
1800 - 1900	56,9	176,0	54,7	95,0	57,1	189,0	57,8	34,0	57,9	21,0	58,8	56,0	59,4	43,0	60,6	52,0	59,2	40,0	57,6	128,0	58,0	114,0	56,2	139,0
≥ 1900	57,6	365,0	56,6	218,0	58,5	766,0	59,3	145,0	60,7	86,0	59,6	104,0	59,6	56,0	61,0	114,0	60,9	169,0	58,6	809,0	58,7	583,0	58,4	678,0
		3623,0		3511,0		3981,0		1491,0		3749,0		3483,0		3815,0		4028,0		3444,0		3759,0		3571,0		3744,0

Tabela 21 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	Jan-07		Fev-07		Mar-07		Abr-07		Mai-07		Jun-07		Jul-07		Ago-07		Set-07		Out-07		Nov-07		Dez-07	
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)
0 - 100	43,7	660,0	43,3	270,0	44,0	608,0	n.d.		45,4	595,0	45,3	604,0	47,0	394,0	48,4	609,0	48,7	726,0	47,0	834,0	43,8	630,0	43,6	355,0
100 - 200	46,7	462,0	46,6	241,0	47,0	494,0	n.d.		49,0	576,0	49,5	425,0	50,5	326,0	51,0	525,0	51,4	595,0	50,2	555,0	46,9	346,0	47,7	244,0
200 - 300	49,4	288,0	50,1	233,0	50,1	384,0	n.d.		51,3	540,0	51,5	432,0	52,8	276,0	52,7	433,0	52,9	419,0	52,2	391,0	50,5	298,0	50,5	247,0
300 - 400	50,4	285,0	52,1	214,0	52,0	309,0	n.d.		53,1	437,0	52,9	302,0	53,3	291,0	53,0	254,0	52,8	315,0	52,6	346,0	52,1	272,0	52,0	249,0
400 - 500	52,3	201,0	53,5	141,0	53,1	241,0	n.d.		53,7	337,0	53,7	231,0	53,0	232,0	53,1	248,0	52,6	229,0	53,3	237,0	52,9	238,0	53,1	148,0
500 - 600	53,3	151,0	54,8	118,0	54,3	195,0	n.d.		54,3	261,0	53,3	229,0	52,6	198,0	52,6	194,0	52,2	191,0	53,3	204,0	54,3	186,0	54,9	123,0
600 - 700	53,0	147,0	55,5	125,0	55,0	167,0	n.d.		54,6	175,0	52,5	236,0	52,0	191,0	52,1	209,0	52,2	142,0	53,9	185,0	53,9	190,0	55,0	134,0
700 - 800	53,3	128,0	55,7	136,0	55,3	163,0	n.d.		54,2	147,0	52,5	140,0	52,1	163,0	52,5	210,0	52,7	126,0	53,5	144,0	54,2	135,0	55,4	104,0
800 - 900	53,6	117,0	55,0	122,0	55,3	95,0	n.d.		53,7	138,0	52,7	129,0	52,4	127,0	53,1	178,0	53,2	84,0	53,6	116,0	53,6	99,0	55,2	86,0
900 - 1000	53,8	111,0	54,9	146,0	55,2	87,0	n.d.		53,6	104,0	52,5	141,0	52,7	150,0	53,1	138,0	53,7	66,0	53,6	110,0	53,9	95,0	54,3	68,0
1000 - 1100	54,1	88,0	55,1	128,0	54,8	87,0	n.d.		53,8	80,0	52,9	139,0	53,3	142,0	54,3	123,0	55,1	71,0	54,5	43,0	54,4	82,0	53,8	82,0
1100 - 1200	53,9	97,0	54,5	128,0	55,0	77,0	n.d.		53,7	83,0	53,2	116,0	54,2	162,0	54,3	86,0	55,5	74,0	54,6	61,0	54,0	84,0	53,8	63,0
1200 - 1300	53,4	107,0	54,6	95,0	54,9	77,0	n.d.		53,8	72,0	53,8	90,0	54,6	165,0	55,6	75,0	56,5	80,0	55,6	39,0	53,9	62,0	53,7	57,0
1300 - 1400	53,9	80,0	54,3	110,0	54,4	60,0	n.d.		53,9	61,0	54,6	64,0	55,6	169,0	55,9	89,0	57,8	73,0	56,6	37,0	54,1	72,0	53,8	48,0
1400 - 1500	53,5	91,0	54,4	114,0	54,2	61,0	n.d.		54,5	70,0	54,8	58,0	56,4	168,0	56,3	72,0	58,5	69,0	57,5	49,0	54,3	51,0	54,0	65,0
1500 - 1600	53,9	80,0	55,2	109,0	54,4	74,0	n.d.		54,6	51,0	55,7	60,0	56,9	186,0	57,4	87,0	58,6	52,0	57,8	41,0	55,4	45,0	54,8	83,0
1600 - 1700	54,0	63,0	54,7	97,0	54,4	73,0	n.d.		54,8	39,0	57,0	42,0	57,9	153,0	57,7	76,0	58,5	33,0	58,3	30,0	55,4	36,0	54,8	62,0
1700 - 1800	53,9	69,0	56,0	83,0	54,9	92,0	n.d.		55,7	45,0	58,9	45,0	58,2	150,0	58,7	61,0	59,3	32,0	59,6	28,0	57,2	22,0	55,0	74,0
1800 - 1900	54,8	67,0	56,9	122,0	55,2	84,0	n.d.		57,5	44,0	58,6	47,0	58,9	102,0	59,1	55,0	59,9	27,0	59,2	30,0	58,7	23,0	56,0	83,0
≥ 1900	55,1	146,0	59,3	471,0	57,8	554,0	n.d.		57,6	77,0	60,0	166,0	60,2	185,0	60,0	139,0	60,0	136,0	59,1	55,0	59,3	80,0	58,5	511,0
		3438,0		3203,0		3982,0		0,0		3932,0		3696,0		3930,0		3861,0		3540,0		3535,0		3046,0		2886,0

Tabela 22 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 3.

Aerogerador 3	Jan-08		Fev-08		Mar-08		Abr-08		Mai-08		Jun-08		Jul-08		Ago-08		Set-08		Out-08		Nov-08		Dez-08			
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	
0 - 100	43,8	591,0	43,5	361,0	44,2	360,0	44,8	551,0	44,8	744,0	48,1	495,0	48,1	539,0	51,2	285,0	52,5	354,0	47,4	128,0	49,1	473,0	47,8	278,0		
100 - 200	47,6	537,0	46,8	236,0	48,4	313,0	48,8	340,0	47,7	633,0	50,3	504,0	51,3	581,0	52,1	374,0	52,8	282,0	50,4	127,0	52,7	403,0	51,1	218,0		
200 - 300	50,2	517,0	49,5	150,0	50,9	301,0	51,8	259,0	50,8	430,0	52,4	540,0	53,0	393,0	52,8	378,0	52,2	191,0	52,6	161,0	54,9	391,0	52,5	185,0		
300 - 400	52,1	284,0	51,4	156,0	52,5	227,0	53,9	181,0	53,0	286,0	53,5	444,0	53,6	344,0	52,9	404,0	51,8	125,0	54,2	73,0	56,5	318,0	53,9	212,0		
400 - 500	53,5	208,0	52,7	156,0	54,9	224,0	53,8	199,0	54,1	244,0	53,6	344,0	53,4	316,0	53,2	294,0	52,9	95,0	54,6	89,0	58,7	250,0	55,0	224,0		
500 - 600	55,0	149,0	54,1	119,0	55,8	167,0	54,4	148,0	54,7	157,0	53,5	282,0	52,6	228,0	53,1	220,0	53,5	78,0	55,9	64,0	57,8	200,0	55,0	207,0		
600 - 700	54,7	109,0	54,8	108,0	56,0	157,0	55,4	117,0	54,5	140,0	53,0	216,0	52,1	179,0	53,6	184,0	55,0	48,0	57,0	38,0	58,4	173,0	54,8	205,0		
700 - 800	55,2	90,0	54,5	76,0	55,5	154,0	54,8	108,0	54,3	122,0	52,9	138,0	52,4	141,0	53,9	192,0	56,1	55,0	56,7	41,0	58,7	161,0	54,8	164,0		
800 - 900	54,5	87,0	54,7	86,0	55,3	145,0	54,9	101,0	53,9	91,0	53,2	149,0	52,7	114,0	54,4	164,0	56,9	53,0	58,1	38,0	58,3	129,0	54,9	119,0		
900 - 1000	54,1	73,0	54,3	62,0	54,3	147,0	54,7	121,0	54,4	91,0	53,7	116,0	53,4	123,0	55,5	153,0	58,6	53,0	58,1	34,0	57,9	131,0	55,0	117,0		
1000 - 1100	54,7	73,0	54,5	83,0	54,4	128,0	54,5	104,0	53,8	86,0	53,5	88,0	53,8	102,0	56,1	144,0	58,6	32,0	59,1	34,0	59,2	105,0	54,6	128,0		
1100 - 1200	55,0	135,0	54,4	85,0	54,5	129,0	54,3	76,0	53,1	90,0	54,3	79,0	55,2	96,0	57,1	157,0	59,1	36,0	57,2	37,0	58,9	87,0	55,1	114,0		
1200 - 1300	54,0	75,0	54,6	81,0	54,6	128,0	54,2	99,0	53,5	82,0	54,5	68,0	55,6	93,0	57,6	154,0	60,0	24,0	58,1	46,0	59,3	76,0	55,4	132,0		
1300 - 1400	54,6	51,0	55,0	67,0	54,8	114,0	54,9	87,0	53,9	81,0	54,6	66,0	56,0	63,0	57,9	165,0	60,2	20,0	58,6	27,0	57,9	79,0	56,2	122,0		
1400 - 1500	54,0	61,0	55,8	85,0	55,1	129,0	55,3	85,0	54,5	68,0	55,8	53,0	56,5	55,0	57,5	108,0	60,5	21,0	59,0	31,0	59,1	52,0	57,2	124,0		
1500 - 1600	55,2	65,0	56,3	109,0	55,4	115,0	55,8	93,0	54,5	45,0	56,0	23,0	58,0	84,0	58,4	112,0	60,7	23,0	58,8	26,0	59,4	60,0	58,3	92,0		
1600 - 1700	55,2	53,0	56,6	125,0	56,1	100,0	56,5	123,0	55,8	61,0	56,1	24,0	58,2	74,0	58,7	81,0	60,9	16,0	59,5	35,0	59,2	54,0	57,8	132,0		
1700 - 1800	56,4	68,0	57,2	149,0	56,5	123,0	57,4	147,0	58,1	68,0	57,7	12,0	59,1	45,0	59,7	75,0	60,8	19,0	59,9	39,0	60,7	35,0	58,8	157,0		
1800 - 1900	56,8	77,0	58,0	207,0	57,3	162,0	58,0	157,0	58,6	59,0	57,5	8,0	60,2	44,0	60,6	97,0	61,3	37,0	60,6	47,0	61,4	39,0	59,3	164,0		
≥ 1900	58,7	443,0	60,3	1033,0	58,5	612,0	59,3	642,0	58,6	120,0	60,0	33,0	61,7	270,0	60,4	384,0	62,4	125,0	63,3	162,0	63,6	99,0	60,4	984,0		
		3746,0		3534,0		3935,0		3738,0		3698,0		3682,0		3884,0		4125,0		1687,0		1277,0		3315,0		4078,0		

## **ANEXO C**

### **ANÁLISE DO AEROGERADOR 5**



Tabela 23 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2006, no aerogerador 5.

Aerogerador 5 Potência (kW)	Jan-06		Fev-06		Mar-06		Abr-06		Mai-06		Jun-06		Jul-06		Ago-06		Set-06		Out-06		Nov-06		Dez-06	
	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo
0 - 100	44,6	537,0	45,2	458,0	45,3	607,0	45,7	364,0	47,0	615,0	48,1	677,0	49,9	541,0	51,0	468,0	50,1	487,0	44,5	341,0	44,8	303,0	43,3	472,0
100 - 200	46,7	312,0	47,6	430,0	47,8	343,0	48,2	270,0	49,9	422,0	51,2	445,0	52,0	352,0	52,3	453,0	51,5	485,0	47,8	246,0	47,2	233,0	46,5	337,0
200 - 300	49,2	204,0	49,2	273,0	50,1	245,0	50,5	168,0	51,7	420,0	52,8	360,0	52,7	307,0	52,8	446,0	51,5	378,0	49,6	212,0	49,4	278,0	48,9	234,0
300 - 400	51,2	178,0	51,2	204,0	52,1	223,0	52,4	82,0	52,8	336,0	52,6	304,0	52,9	268,0	53,1	423,0	51,7	289,0	51,1	226,0	50,7	267,0	50,1	237,0
400 - 500	52,5	139,0	51,4	168,0	53,3	185,0	53,5	75,0	53,2	249,0	53,0	240,0	53,3	256,0	53,6	343,0	52,3	258,0	50,9	159,0	51,3	205,0	51,2	219,0
500 - 600	53,0	105,0	52,7	134,0	53,8	161,0	52,8	55,0	53,7	242,0	52,6	143,0	54,2	245,0	54,4	293,0	53,2	226,0	50,8	162,0	51,5	206,0	51,7	175,0
600 - 700	53,3	105,0	53,5	121,0	53,7	129,0	52,6	40,0	53,6	199,0	53,1	122,0	54,5	252,0	55,5	219,0	54,2	195,0	51,2	116,0	51,5	198,0	51,7	128,0
700 - 800	53,4	86,0	52,0	122,0	53,0	148,0	53,1	31,0	53,2	189,0	53,3	157,0	55,2	198,0	56,3	203,0	55,2	185,0	51,5	125,0	51,7	150,0	52,0	134,0
800 - 900	53,1	110,0	52,7	83,0	52,7	116,0	52,6	38,0	53,1	156,0	53,5	152,0	55,9	157,0	57,4	182,0	56,1	180,0	51,9	154,0	51,9	153,0	51,9	129,0
900 - 1000	52,6	105,0	53,5	80,0	52,2	82,0	53,0	27,0	52,0	145,0	54,5	119,0	56,1	151,0	57,6	166,0	56,7	169,0	52,3	126,0	52,4	149,0	51,8	122,0
1000 - 1100	52,7	83,0	52,7	88,0	52,1	101,0	52,7	35,0	52,2	163,0	55,1	121,0	57,1	141,0	57,1	129,0	56,8	148,0	52,7	118,0	52,5	129,0	51,5	124,0
1100 - 1200	52,4	58,0	52,5	71,0	52,3	108,0	53,4	33,0	52,4	109,0	55,6	104,0	57,7	131,0	57,9	132,0	56,5	92,0	53,2	99,0	53,6	111,0	52,0	122,0
1200 - 1300	52,8	66,0	52,5	67,0	52,2	105,0	53,1	28,0	52,9	79,0	55,9	112,0	57,7	138,0	58,5	115,0	57,3	75,0	53,8	112,0	53,9	129,0	52,5	89,0
1300 - 1400	52,5	46,0	52,4	79,0	52,5	95,0	53,3	29,0	53,2	93,0	56,3	102,0	58,4	116,0	58,2	90,0	57,1	59,0	54,6	133,0	54,6	115,0	53,2	89,0
1400 - 1500	52,4	52,0	52,6	68,0	53,5	93,0	55,3	24,0	54,0	82,0	56,8	77,0	57,9	105,0	58,6	104,0	58,1	63,0	55,7	118,0	55,6	111,0	53,4	100,0
1500 - 1600	53,2	38,0	51,0	56,0	54,0	89,0	55,1	34,0	54,2	71,0	57,3	82,0	58,3	127,0	58,9	52,0	57,9	45,0	56,1	159,0	56,6	103,0	54,3	112,0
1600 - 1700	50,6	24,0	52,2	59,0	54,6	102,0	54,8	23,0	55,3	64,0	58,0	55,0	58,3	96,0	59,4	47,0	58,1	43,0	56,5	147,0	56,7	104,0	55,1	121,0
1700 - 1800	54,4	53,0	53,9	76,0	55,5	126,0	55,8	24,0	56,1	44,0	58,5	56,0	58,5	109,0	60,2	48,0	58,4	43,0	57,3	136,0	57,2	120,0	56,3	99,0
1800 - 1900	56,1	136,0	54,1	67,0	56,2	162,0	56,5	21,0	56,4	43,0	58,8	59,0	59,1	97,0	60,6	47,0	59,3	44,0	57,7	149,0	57,9	148,0	57,8	116,0
≥ 1900	55,8	145,0	54,0	225,0	57,8	792,0	58,5	130,0	58,8	113,0	59,2	173,0	59,4	105,0	61,0	139,0	60,6	222,0	58,1	849,0	58,3	607,0	59,1	618,0
		2582,0		2929,0		4012,0		1531,0		3834,0		3660,0		3892,0		4099,0		3686,0		3887,0		3819,0		3777,0

Tabela 24 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2007, no aerogerador 5.

Aerogerador 5 Potência (kW)	Jan-07		Fev-07		Mar-07		Abr-07		Mai-07		Jun-07		Jul-07		Ago-07		Set-07		Out-07		Nov-07		Dez-07	
	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo
0 - 100	43,3	699,0	42,7	327,0	44,1	571,0	n.d.		45,5	579,0	45,3	546,0	46,8	394,0	46,1	110,0	46,2	753,0	43,9	966,0	43,2	626,0	42,4	390,0
100 - 200	46,5	377,0	46,2	283,0	46,9	526,0	n.d.		48,7	527,0	49,1	434,0	49,9	255,0	48,7	86,0	48,4	557,0	46,7	524,0	46,1	498,0	46,2	258,0
200 - 300	48,7	286,0	49,8	231,0	49,4	407,0	n.d.		50,8	465,0	51,0	346,0	52,5	260,0	50,8	77,0	50,5	405,0	49,5	376,0	48,7	350,0	48,9	255,0
300 - 400	50,5	241,0	51,6	196,0	51,2	298,0	n.d.		52,2	396,0	52,4	302,0	53,5	258,0	51,7	44,0	52,2	317,0	51,7	365,0	51,0	248,0	51,1	268,0
400 - 500	51,7	221,0	52,5	173,0	52,5	236,0	n.d.		53,4	323,0	53,3	286,0	53,3	237,0	51,9	48,0	52,9	265,0	52,7	235,0	52,8	256,0	52,2	193,0
500 - 600	52,5	158,0	53,7	159,0	53,4	175,0	n.d.		53,7	289,0	53,2	192,0	53,0	223,0	52,3	59,0	53,3	215,0	53,7	263,0	53,5	234,0	53,6	141,0
600 - 700	52,8	123,0	54,3	114,0	54,3	169,0	n.d.		53,5	260,0	52,8	185,0	52,2	198,0	52,9	59,0	53,0	119,0	53,1	233,0	53,9	161,0	53,6	102,0
700 - 800	52,9	123,0	54,2	108,0	54,6	158,0	n.d.		53,1	179,0	52,3	187,0	51,7	176,0	52,9	30,0	51,9	112,0	53,4	114,0	53,4	138,0	54,4	116,0
800 - 900	53,2	94,0	54,7	103,0	54,1	113,0	n.d.		52,7	136,0	52,7	171,0	52,0	145,0	52,6	25,0	51,9	129,0	53,0	104,0	52,9	111,0	54,6	104,0
900 - 1000	53,3	102,0	54,6	98,0	53,9	123,0	n.d.		52,5	94,0	52,7	131,0	52,5	131,0	52,9	21,0	52,0	86,0	53,0	97,0	53,2	100,0	54,2	110,0
1000 - 1100	53,6	80,0	54,7	102,0	54,5	103,0	n.d.		52,7	108,0	52,9	129,0	53,4	98,0	53,0	21,0	52,7	75,0	52,9	69,0	53,2	73,0	53,6	80,0
1100 - 1200	53,7	52,0	54,1	104,0	54,2	77,0	n.d.		52,9	91,0	53,5	118,0	54,1	132,0	53,8	18,0	53,0	84,0	52,6	78,0	54,1	64,0	54,4	89,0
1200 - 1300	53,8	73,0	54,5	94,0	53,9	88,0	n.d.		53,3	83,0	53,9	138,0	55,4	137,0	53,7	10,0	53,8	70,0	53,3	62,0	53,7	67,0	53,5	99,0
1300 - 1400	53,4	76,0	54,8	90,0	54,0	72,0	n.d.		53,5	82,0	54,8	98,0	56,0	159,0	55,5	21,0	54,5	62,0	53,0	65,0	54,4	58,0	53,3	74,0
1400 - 1500	54,0	65,0	55,3	110,0	54,5	76,0	n.d.		54,1	72,0	55,5	95,0	56,5	154,0	54,9	17,0	55,3	54,0	53,8	40,0	55,0	41,0	53,5	58,0
1500 - 1600	53,5	59,0	55,1	120,0	55,3	58,0	n.d.		54,2	70,0	56,9	58,0	57,1	196,0	55,8	24,0	55,9	69,0	54,7	36,0	55,4	50,0	54,3	80,0
1600 - 1700	54,2	47,0	55,7	109,0	55,7	51,0	n.d.		54,8	42,0	56,8	77,0	57,6	207,0	56,0	21,0	56,0	42,0	55,0	13,0	56,1	36,0	54,2	57,0
1700 - 1800	54,7	53,0	55,8	116,0	56,1	65,0	n.d.		56,1	59,0	58,2	57,0	57,8	184,0	53,7	17,0	57,2	34,0	55,9	13,0	56,0	25,0	54,5	66,0
1800 - 1900	55,1	65,0	56,8	118,0	56,7	81,0	n.d.		57,3	51,0	58,7	54,0	58,9	168,0	58,7	16,0	59,4	28,0	57,2	19,0	57,2	6,0	55,2	65,0
≥ 1900	56,2	175,0	59,4	425,0	59,3	588,0	n.d.		58,5	98,0	60,2	109,0	59,4	255,0	57,9	11,0	59,2	150,0	58,2	47,0	58,4	49,0	57,7	592,0
		3169,0		3180,0		4035,0		0,0		4004,0		3713,0		3967,0		735,0		3626,0		3719,0		3191,0		3197,0

Tabela 25 - Temperatura média mensal do óleo da caixa de engrenagens e tempo de funcionamento, por escalão de potência, no ano 2008, no aerogerador 5.

Aerogerador 5	Jan-08		Fev-08		Mar-08		Abr-08		Mai-08		Jun-08		Jul-08		Ago-08		Set-08		Out-08		Nov-08		Dez-08	
	Potência (kW)	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)	Tempo	AvgTemp 3 (°C)
0 - 100	43,0	620,0	42,9	379,0	43,2	377,0	43,4	532,0	43,5	702,0	46,4	439,0	46,4	462,0	46,8	311,0	46,0	297,0	44,3	63,0	44,5	476,0	45,7	264,0
100 - 200	45,3	498,0	45,1	314,0	47,0	273,0	48,0	309,0	46,3	587,0	49,5	436,0	49,8	425,0	49,7	257,0	49,7	213,0	47,3	57,0	48,3	383,0	49,2	235,0
200 - 300	48,6	406,0	48,0	196,0	49,7	266,0	50,4	228,0	48,9	455,0	51,5	420,0	51,8	370,0	52,2	288,0	52,0	218,0	51,9	71,0	51,5	350,0	51,5	194,0
300 - 400	50,8	330,0	50,4	141,0	52,0	225,0	52,2	229,0	51,1	270,0	52,8	435,0	53,0	320,0	53,2	301,0	52,8	151,0	54,6	63,0	53,7	305,0	54,2	230,0
400 - 500	52,7	210,0	52,6	109,0	53,0	169,0	53,3	210,0	53,4	238,0	53,6	364,0	53,3	216,0	53,1	300,0	54,7	101,0	56,1	58,0	55,8	268,0	56,2	200,0
500 - 600	53,6	158,0	53,9	101,0	54,4	183,0	53,8	183,0	53,8	186,0	53,6	304,0	52,6	232,0	52,7	272,0	55,8	91,0	57,1	38,0	57,1	260,0	57,8	184,0
600 - 700	54,4	114,0	54,8	78,0	54,6	168,0	54,7	146,0	54,3	157,0	53,1	242,0	52,0	228,0	52,2	192,0	56,5	48,0	59,2	22,0	57,8	158,0	59,0	181,0
700 - 800	54,8	89,0	54,7	78,0	55,0	174,0	54,7	125,0	53,7	124,0	52,5	165,0	51,6	175,0	51,8	172,0	54,7	42,0	58,0	29,0	59,1	156,0	59,6	144,0
800 - 900	55,3	69,0	54,4	93,0	54,5	160,0	54,6	106,0	53,6	111,0	52,3	137,0	51,9	148,0	52,0	155,0	55,3	44,0	55,3	21,0	59,5	143,0	59,4	169,0
900 - 1000	54,6	50,0	53,9	91,0	54,2	132,0	54,2	113,0	53,8	83,0	52,3	129,0	52,1	121,0	52,6	170,0	56,9	29,0	60,9	23,0	60,0	141,0	60,2	129,0
1000 - 1100	54,9	81,0	53,7	85,0	53,9	121,0	54,5	106,0	53,0	81,0	52,5	106,0	52,4	126,0	53,4	132,0	57,5	46,0	60,3	18,0	60,6	130,0	59,8	133,0
1100 - 1200	54,2	67,0	53,2	98,0	53,9	110,0	54,1	74,0	53,0	76,0	53,2	94,0	53,1	114,0	53,8	145,0	57,8	52,0	59,6	23,0	60,7	113,0	59,7	120,0
1200 - 1300	54,9	44,0	53,2	74,0	54,1	141,0	54,6	95,0	53,4	72,0	53,6	93,0	53,7	118,0	54,5	170,0	57,2	40,0	58,8	15,0	59,9	96,0	59,5	128,0
1300 - 1400	55,1	64,0	53,6	81,0	54,0	130,0	54,6	87,0	53,3	89,0	54,6	56,0	54,4	107,0	54,9	170,0	56,9	48,0	59,7	25,0	59,4	95,0	59,4	118,0
1400 - 1500	53,9	59,0	53,9	101,0	53,8	92,0	54,6	76,0	54,0	81,0	55,7	71,0	55,1	118,0	55,6	149,0	58,2	29,0	58,8	26,0	59,1	96,0	59,3	120,0
1500 - 1600	54,6	69,0	54,6	119,0	53,8	102,0	54,5	93,0	54,1	83,0	55,7	47,0	55,7	73,0	56,2	141,0	58,8	30,0	59,9	20,0	59,4	66,0	59,4	129,0
1600 - 1700	54,6	62,0	55,2	157,0	54,2	90,0	55,7	85,0	54,4	66,0	56,7	38,0	56,9	101,0	56,9	124,0	58,7	26,0	59,2	26,0	58,8	59,0	59,1	152,0
1700 - 1800	54,8	67,0	55,8	156,0	55,0	113,0	55,9	126,0	55,7	59,0	57,2	20,0	58,1	71,0	57,9	116,0	59,6	17,0	58,9	25,0	59,5	31,0	59,1	158,0
1800 - 1900	55,0	63,0	56,5	222,0	55,6	126,0	56,5	158,0	56,0	60,0	57,2	21,0	58,7	63,0	59,0	115,0	60,0	30,0	58,8	30,0	59,5	30,0	59,3	194,0
≥ 1900	57,5	419,0	59,7	982,0	57,7	614,0	58,4	686,0	57,9	168,0	59,7	54,0	60,0	307,0	59,4	387,0	64,4	89,0	60,1	82,0	61,2	170,0	61,8	885,0
		3539,0		3655,0		3766,0		3767,0		3748,0		3671,0		3895,0		4067,0		1641,0		735,0		3526,0		4067,0