

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Otimização da manutenção e extensão de vida de rolamentos principais de aerogeradores de acoplamento direto

José Pedro Pereira Canelas Figueiredo



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador na FEUP: Luís António de Andrade Ferreira

Orientador na Finerge: Gonçalo Miguel Vieira da Silva

15 de julho de 2021

Otimização da manutenção e extensão de vida de rolamentos principais de aerogeradores de acoplamento direto

José Pedro Pereira Canelas Figueiredo

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Abstract

Direct drive wind turbines have a transmission system that does not require the usage of a gearbox between the rotor and the generator. This is the component with the highest failure rate and since it has been removed from this type of wind turbines, the main bearings become the most crucial component. Therefore, it's necessary to ensure that they receive proper maintenance since their failure leads to the stoppage of the wind turbine.

The present dissertation takes place in a partnership with *Finerge*, a company that produces renewable energy, namely wind and solar. *Finerge* recorded high losses due to recurring bearings breakdown of *ENERCON* direct drive models, which could be related to the type of maintenance granted by them. Their maintenance is considered inadequate since it's reactive maintenance which can be associated with high costs, reduction of the component's durability leading to a reduction of produced energy.

With these factors in consideration, in this dissertation, the models mentioned above are analyzed, E-70 E4, E-82 E1, E-82 E2, and E-92, as well as their failure records between the years of 2012 and 2020. Possible root causes are taken into account and lastly, maintenance techniques that optimize the bearing's operation. There's a focus on predictive maintenance techniques that allow the early detection of bearing faults and in other types of maintenance that are able to extend the bearings lifetime and to reduce the number of failures, allowing improved management of *Finerge* assets.

Keywords: Wind Energy; Wind Turbines; Direct Drive; Wind Turbine Bearings; Predictive Maintenance.

Resumo

Os aerogeradores de acoplamento direto possuem uma configuração no sistema de transmissão das turbinas que elimina a necessidade da utilização de uma caixa multiplicadora entre o rotor e o gerador. Este é o componente com maior taxa de incidência de avarias e uma vez removido, os componentes críticos deste tipo de aerogeradores, passam a ser os rolamentos principais. Devido à importância destes componentes, é necessário garantir o seu bom funcionamento através de uma manutenção devida, visto que em caso de avaria, estes levam à interrupção do funcionamento da turbina eólica.

A presente dissertação ocorre em parceria com a *Finerge*, uma empresa produtora de energia renovável, nomeadamente eólica e solar. Esta apresentou um elevado prejuízo devido a avarias recorrentes nos rolamentos em aerogeradores de acoplamento direto da *ENERCON*, que podem estar relacionadas com o tipo de manutenção proporcionada pelo fabricante dos aerogeradores. Esta é considerada insuficiente, uma vez que se trata de uma manutenção reativa, o que se associa a custos mais elevados, diminuição da durabilidade dos componentes e por consequência, a uma diminuição da produção de energia.

Tendo estes fatores em consideração, nesta dissertação são analisados os modelos em questão, E-70 E4, E-82 E1, E-82 E2 e E-92 e os seus registos de falhas entre os anos de 2012 e 2020. São também estudadas possíveis causas das avarias dos rolamentos e por último, técnicas de manutenção que permitam otimizar o funcionamento dos seus rolamentos. Focam-se em técnicas de manutenção preditiva que permitam detetar as falhas com a devida antecedência e outros tipos de manutenção que são capazes de estender a vida útil do rolamento e reduzir o número de avarias, proporcionando assim uma gestão ótima dos ativos da *Finerge*.

Palavras-chave: Energia Eólica; Turbinas Eólicas; Acoplamento Direto; Rolamentos de Aerogeradores; Manutenção Preditiva.

Agradecimentos

A presente dissertação é o resultado de um semestre de dedicação mas é também o momento final de um percurso de 5 anos passados na grande Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, onde se reflete todo o conhecimento adquirido nesse espaço de tempo.

Quero agradecer aos meus orientadores, o Professor Luís Ferreira e o Engenheiro Gonçalo Silva da *Finerge*, que demonstraram uma disponibilidade e auxílio incansável, garantindo-me todo o apoio necessário durante o desenvolvimento deste projeto.

Quero agradecer também aos meus amigos mais próximos que promoveram uma série de memórias e um enorme crescimento pessoal ao longo desta jornada.

Por último, quero agradecer aos meus pais e à minha avó, os responsáveis pela pessoa que sou hoje, que sempre se preocuparam com a minha formação e que sempre me proporcionaram as melhores condições para a obter.

José Figueiredo

*“Trabalho todos os dias da minha vida
para chegar a uma espécie de destino.”*

João Campo Grande

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento da dissertação e motivação na <i>Finerge</i>	2
1.2	Incorporação na <i>Finerge</i>	2
1.3	Objetivo da dissertação	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Estado da arte	5
2.1	Introdução	5
2.2	Aerogeradores	5
2.2.1	Acoplamento direto vs Caixa multiplicadora	6
2.2.2	Modelos dos aerogeradores	7
2.2.3	Estrutura e modo de funcionamento	8
2.2.4	Rolamentos dos modelos	9
2.3	Rolamentos	12
2.3.1	Fundamentos	12
2.3.2	Lubrificação	15
2.3.3	Falhas	16
2.3.4	Características dos rolamentos dos aerogeradores	17
2.4	Técnicas de análise de falhas	19
2.4.1	Análise de dados de vida	20
2.4.2	Análise de modo e efeito de falha	21
2.4.3	Análise de causa raiz	22
2.5	Métodos de manutenção	22
2.5.1	Manutenção preditiva	22
2.6	Conclusões	24
3	Análise do caso de estudo	25
3.1	Introdução	25
3.2	Manutenção atual	25
3.3	Histórico de falhas	26
3.3.1	Implicações financeiras	30
3.4	Análise de fiabilidade para aplicação da distribuição de Weibull	35
3.5	Análise de modo e efeito de falha dos rolamentos	36
3.6	Conclusões	38
4	Análise dos rolamentos críticos	39
4.1	Introdução	39
4.2	Seleção dos rolamentos	39

4.3	Análise do lubrificante	57
4.4	Análise do RCA	57
4.4.1	Relatório da <i>ENERCON</i>	58
4.4.2	Relatório da 8.2	58
4.5	Conclusões	59
5	Propostas de melhoria da manutenção	61
5.1	Introdução	61
5.2	Manutenção/Monitorização ao longo da vida de um rolamento	61
5.2.1	Instalação	61
5.2.2	Funcionamento da máquina	62
5.2.3	Falha do rolamento	66
5.3	Redução das causas de falha mais recorrentes	66
5.3.1	Fadiga	66
5.3.2	Lubrificação	67
5.3.3	Contaminação	67
5.4	Conclusões	67
6	Conclusões e trabalhos futuros	69
	Referências	73
A	Dados para a análise de fiabilidade	75
B	FMEA para os 4 modelos	95

Lista de Figuras

2.1	Evolução da capacidade de energia eólica na Europa nos últimos 10 anos	6
2.2	Contribuição de cada país para a capacidade total de energia eólica na Europa em 2020	6
2.3	Quantidade de aerogeradores de cada modelo	8
2.4	Estrutura dos aerogeradores	9
2.5	Corte transversal da nacele do modelo E-82 E2	10
2.6	Componentes na cabeça do rotor	11
2.7	Componentes de um rolamento	12
2.8	Ângulo de contacto para rolamentos radiais (a) e axiais (b)	13
2.9	Tipos de elementos rolantes	13
2.10	Detalhes dos anéis de rolamentos	14
2.11	Tipos de guiamento das gaiolas	14
2.12	Motivos de avaria de rolamentos	16
2.13	Rolamento frontal do modelo E-82 E2: rolamento de rolos cônicos de dupla pista	18
2.14	Rolamento traseiro do modelo E-82 E2: rolamento de rolos cilíndricos	19
2.15	Rolamento de <i>yaw</i> do modelo E-70 E4: rolamento de esferas de dupla pista com coroa de orientação	19
3.1	Vestígios de danos em rolamentos traseiros	28
3.2	Grua para remoção da cabeça do rotor	31
3.3	<i>Hub</i> do rotor com o veio principal, adaptadores de pá e revestimento da cabeça do rotor	32
3.4	Desacoplamento entre o veio principal e o <i>hub</i> do rotor na fábrica <i>ENERCON</i> . .	32
3.5	Remoção do rolamento traseiro do veio principal na fábrica <i>ENERCON</i>	33
3.6	Top 10 causas ranqueadas por NPR	37
4.1	Representação dos diversos componentes em <i>SolidWorks</i>	40
4.2	Vista em corte do rotor <i>hub</i> e veio principal	41
4.3	Cargas aerodinâmicas que atuam numa secção de pá	41
4.4	Diagrama de corpo livre estático do conjunto pás e <i>hub</i> do rotor	44
4.5	Diagrama de corpo livre dinâmico do conjunto pás e <i>hub</i> do rotor	44
4.6	Diagrama de corpo livre do conjunto pás e <i>hub</i> do rotor, visto segundo uma direcção normal ao plano zOy	45
4.7	Diagrama de relação de ângulos	46
4.8	Diagrama de corpo livre do veio principal	50
4.9	Esquema do veio do modelo E-70 E4 e diagramas de esforços e momentos para a análise estática	52

4.10	Esquema do veio do modelo E-82 E1 e diagramas de esforços e momentos para a análise estática	52
4.11	Esquema do veio do modelo E-70 E4 e diagramas de esforços e momentos para a análise dinâmica	53
4.12	Esquema do veio do modelo E-82 E1 e diagramas de esforços e momentos para a análise dinâmica	53
5.1	Exemplo do impacto de uma fissura no anel exterior no modo de vibração do rolamento	63
5.2	Separação das vibrações geradas pela introdução do filtro passa alto	63
5.3	Exemplo de análise de vibrações para um dano no anel exterior de um rolamento	64
B.1	FMEA para o modelo E-70 E4. Relatório gerado no programa <i>ReliaSoft</i>	95
B.2	FMEA para o modelo E-82 E1. Relatório gerado no programa <i>ReliaSoft</i>	96
B.3	FMEA para o modelo E-82 E2. Relatório gerado no programa <i>ReliaSoft</i>	96
B.4	FMEA para o modelo E-92. Relatório gerado no programa <i>ReliaSoft</i>	97

Lista de Tabelas

2.1	Comparação das propriedades principais de aerogeradores entre configurações de acoplamento direto e de caixa multiplicadora	7
2.2	Principais características para os 4 modelos de aerogeradores	8
3.1	Quantidade e idade média para cada modelo dos aerogeradores	26
3.2	Registo dos aerogeradores com avarias nos rolamentos	27
3.3	Incidência de avarias em cada tipo de rolamento pelos diferentes modelos	28
3.4	Tempo médio até falha de cada tipo de rolamento por modelo (em anos)	28
3.5	Tempo médio de paragem do funcionamento do aerogerador em dias em caso de avaria de cada tipo de rolamento por modelo	29
3.6	Incidências de avarias por parque eólico	29
3.7	Valor médio da perda produção em € provocado por cada tipo de rolamento para os diferentes modelos	33
3.8	Custos associados ao transporte e aluguer de gruas para cada tipo de rolamento	34
3.9	Prejuízo total causado pelas 25 avarias ocorridas entre 2012 e 2020	34
3.10	Resultado da análise de fiabilidade para os variados rolamentos.	35
3.11	Critérios para a atribuição dos valores para a severidade e ocorrência.	37
4.1	Dados necessários para a determinação das forças F_1 e F_2	43
4.2	Valor das cargas para cada modelo	49
4.3	Propriedades dos 3 tipos de lubrificante	57
5.1	Comparação dos custos de monitorização	65
A.1	Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-70 E4	75
A.2	Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-82 E1	75
A.3	Dados relativos ao rolamento traseiro do modelo E-82 E1	77
A.4	Dados relativos ao rolamento de yaw do modelo E-82 E1	78
A.5	Dados relativos aos rolamentos de pás do modelo E-82 E2	80
A.6	Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-82 E2	85
A.7	Dados relativos ao rolamento traseiro do modelo E-82 E2	90

Acrónimos e Siglas

CAPEX	<i>Capital expenditures</i>
EPK	<i>Enercon Partner Konzept</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
FMEA	<i>Failure mode and effects analysis</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NLGI	<i>National Lubricating Grease Institute</i>
NPR	Número de prioridade de risco
OPEX	<i>Operating expenses</i>
O&M	<i>Operation and Maintenance</i>
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
RCA	<i>Root cause analysis</i>
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition</i>
SKF	<i>Svenska KullagerFabriken</i>

Capítulo 1

Introdução

As energias renováveis constituem um setor de extrema relevância nos dias de hoje, pois a sua utilização e contínua exploração visam substituir os tipos de energia não renováveis que são prejudiciais para o planeta Terra. Este tipo de energia promove a conservação do planeta, uma vez que a sua fonte é ilimitada e não é nociva para o ambiente, mantendo assim a integridade da camada do ozono e evitando o aquecimento global.

Visando atingir a meta de um futuro neutro em carbono em 2050, estabelecida no Acordo Verde Europeu articulado pela Comissão Europeia, foi aprovado em Portugal a 10 de Julho de 2020, o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC). Este define políticas de atuação a médio prazo para a década de 2021-2030. Nesta fase de transição energética é necessária uma análise cuidada das várias tecnologias existentes e emergentes, que possam contribuir para a descarbonização do sistema energético de forma equilibrada e sustentável [1]. Neste sentido e focando na energia eólica, verifica-se que os aerogeradores se aproximam do fim da sua vida útil, normalmente entre 20 a 25 anos. Assim surgem duas possibilidades: o *repowering*, que consiste na substituição das turbinas eólicas por outras com tecnologia mais moderna e de maior capacidade geradora, ou o prolongamento da vida útil dos equipamentos. É então necessário fazer uma decisão tendo por base uma avaliação cuidada ao nível técnico-económico entre estas opções, tendo em consideração que os custos de manutenção aumentam em conjunto com a idade dos equipamentos [1].

Esta dissertação ocorreu em parceria com a empresa *Finerge* e foca-se no prolongamento da vida útil dos aerogeradores através da otimização da sua manutenção, mais específica para os seus rolamentos principais, uma vez que são os elementos mais críticos dos modelos em análise. Procura-se assim obter uma gestão ótima dos ativos da empresa e uma melhoria contínua do desempenho técnico, económico e ambiental, bem como um serviço de operação e manutenção de excelência.

1.1 Enquadramento da dissertação e motivação na *Finerge*

Esta dissertação está inserida no departamento de O&M (*Operation and Maintenance*) da *Finerge*, uma empresa focada na produção de energia sustentável para o mundo. É a segunda maior produtora de energia renovável em Portugal e sexta na península Ibérica, operando 53 centrais eólicas e 16 parque solares, em mais de 46 concelhos do nosso país e 3 províncias de Espanha. Possui quase 700 aerogeradores e milhares de módulos fotovoltaicos, que recolhem a energia do vento e captam a energia do sol, transformando estas fontes de energia em eletricidade limpa [2].

A *Finerge* procura desenvolver este tema uma vez que a otimização da manutenção é uma área pouco explorada nesta indústria e com bastante potencial. Esta componente é muitas vezes subestimada por grandes operadores [3], o que faz surgir uma oportunidade de obter mais valor dos aerogeradores através da extensão da sua vida útil recorrendo a este conceito.

A manutenção dos rolamentos efetuada pelo fabricante, *ENERCON*, rege-se apenas a uma inspeção visual do estado do lubrificante de 6 em 6 meses. Esta manutenção revela-se insuficiente uma vez que existem vários casos de rolamentos com necessidade de serem substituídos muito antes do fim da sua vida útil prevista. Neste sentido, a *Finerge* ambiciona criar equipas de manutenção próprias, com o objetivo de aplicar métodos de manutenção mais rigorosos, reduzindo a percentagem de baixas dos rolamentos e evitando a necessidade de depender de empresas externas ou do próprio fabricante.

1.2 Incorporação na *Finerge*

Devido à situação pandémica presente no quotidiano da sociedade atual, não foi possível realizar a dissertação em ambiente profissional presencial, visto que na grande maioria da realização desta, a *Finerge* encontrava-se em regime de teletrabalho. No entanto, esta situação não foi de todo um obstáculo devido ao acompanhamento e disponibilidade prestada pelos colaboradores da *Finerge*.

Foi possível participar em reuniões online semanais ao longo do projeto para a discussão do seu desenvolvimento, sendo que uma das reuniões contou com a participação da 8.2, uma empresa de consultoria de turbinas eólicas. Realizou-se também uma visita à sede da empresa em Matosinhos após o final do estado de emergência e outra na fase final da dissertação com os dois orientadores responsáveis. Foram ainda realizadas três visitas a centrais eólicas onde foi possível estar em contacto com os aerogeradores e técnicos da *Finerge*, participar numa reunião com a empresa *ONYX InSight*, uma empresa perita em análise de vibrações e monitorização do estado de condição de rolamentos, visitar armazéns da *ENERCON* que possuíam rolamentos danificados dos modelos estudados na dissertação e ainda acompanhar uma análise de vibrações a rolamentos realizada pela empresa *DMC* onde foi possível realizar uma troca de impressões do tema com os seus técnicos.

A realização da dissertação com a *Finerge* possibilitou um crescimento pessoal devido à realização de um projeto de um caso prático no mundo profissional e também à quantidade de contactos criados e impressões trocadas possibilitadas pela *Finerge*.

1.3 Objetivo da dissertação

A dissertação passa por analisar os rolamentos principais de quatro modelos de aerogeradores do fabricante *ENERCON*, o E70-E4, E82-E1, E82-E2 e E-92, tendo como objetivo:

- Familiarização com o modo de funcionamento dos aerogeradores e tipologias dos seus rolamentos;
- Análise do histórico de falhas/efeitos (FMEA) e relatórios de causa raiz existentes (RCA);
- Desenvolvimento/adaptação de uma metodologia/procedimentos de manutenção e diagnóstico preditivo;
- Aplicação da metodologia com vista à otimização dos planos de manutenção preventiva e preditiva, identificação de medidas de melhoria e mitigação de danos.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação presente encontra-se dividida em 6 capítulos:

- **Capítulo 1: Introdução** - Neste capítulo realiza-se uma introdução ao tema da dissertação bem como o seu enquadramento no ambiente empresarial. São ainda descritos os objetivos da dissertação e a sua estrutura;
- **Capítulo 2: Estado da arte** - Neste capítulo abordam-se os temas teóricos necessários para a compreensão do desenvolvimento da dissertação. Inicia-se por uma explicação da estrutura e do modo de funcionamento dos aerogeradores seguido por uma introdução aos fundamentos de rolamentos. Por último abordam-se as técnicas de análise de falhas utilizadas e termina com alguns tipos de manutenção para rolamentos de aerogeradores existentes no mercado atual;
- **Capítulo 3: Análise do caso de estudo** - Neste capítulo avalia-se a manutenção atual dos rolamentos e é feita uma análise aos registos de avarias das turbinas eólicas da *Finerge* dos modelos de interesse, bem como as suas implicações financeiras. De seguida aplicam-se técnicas de análise de falhas de modo a perceber quais os rolamentos com maior urgência de intervenção;
- **Capítulo 4: Análise dos rolamentos críticos** - Neste capítulo analisam-se os rolamentos críticos determinados no capítulo anterior relativamente aos fatores com maior potencial de risco. É então realizada um estudo ao dimensionamento dos rolamentos para verificar se

estes são adequados para a sua aplicação e ainda uma análise ao seu lubrificante. Por último avalia-se os relatórios de causa raiz existentes para comparar as suas conclusões com as análises realizadas;

- **Capítulo 5: Propostas de melhoria da manutenção** - Neste capítulo propõe-se melhorias da manutenção com o intuito de otimizar e estender a vida útil dos rolamentos. Na primeira secção são referidas técnicas a aplicar nos distintos momentos da vida de um rolamento. Na secção seguinte referem-se estratégias que permitem evitar as falhas mais recorrentes e complementar as técnicas referidas na secção anterior;
- **Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros** - Neste capítulo referem-se as conclusões principais determinadas na dissertação realizada, referindo as principais propostas de melhoria a serem aplicadas pela *Finerge*. Por último discute-se ainda trabalhos futuros a realizar que podem vir a complementar o trabalho realizado ao longo da dissertação e acrescentar um maior valor na manutenção a realizar.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de forma a compreender os conceitos teóricos dos temas principais abordados ao longo da dissertação. Inicia-se pela abordagem dos aerogeradores e do seu modo de funcionamento, passando de seguida para os rolamentos. Por último é exposto as técnicas de análise de falhas utilizadas neste estudo seguido por técnicas de manutenção aplicadas aos rolamentos de aerogeradores.

2.2 Aerogeradores

Em 1982 instalou-se na Califórnia cerca de 20 a 30 turbinas eólicas de 22 kW, dando início à indústria de energia eólica [4]. Foi o primeiro passo para a origem de uma indústria ambiciosa e capaz de desviar a humanidade para um caminho de conservação do planeta. Desde então esta área evoluiu bastante, tendo sido construídos milhares de campos eólicos por todo o planeta e continua em constante crescimento com a evolução da tecnologia dos aerogeradores, capazes de atingir maiores dimensões e obter um melhor aproveitamento da energia do vento.

Após 38 anos desde o início desta indústria ela encontra-se longe de estar dominada, havendo ainda muita manobra para a sua otimização e obter um melhor proveito desta. O Acordo Verde Europeu (*European Green Deal*) divulgado em 2019, ambiciona impulsionar a área das energias renováveis para os países da União Europeia, conseguindo gerar empregos, refinar a tecnologia e lutar pela preservação do planeta. Com o objectivo de atingir em 2050 uma Europa neutra em emissão de carbono, os países Europeus continuam a investir na energia eólica, perfazendo em 2020 uma capacidade total de 220 GW. Na figura 2.1 observa-se o crescimento da indústria eólica nos últimos 10 anos e na figura 2.2 a contribuição de cada país para o ano de 2020.

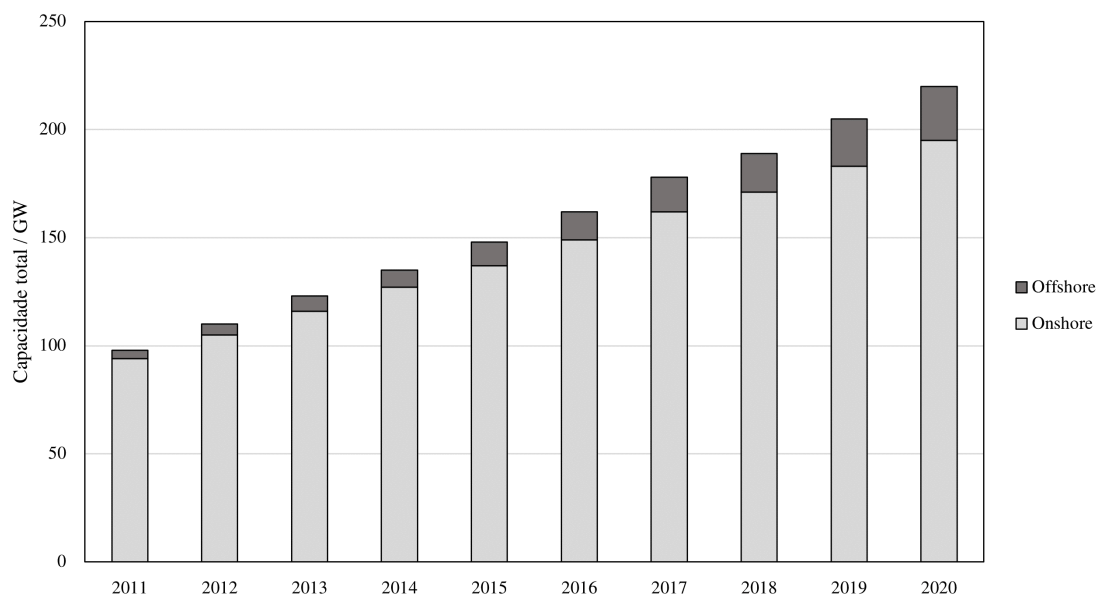


Figura 2.1: Evolução da capacidade de energia eólica na Europa nos últimos 10 anos. Adaptado de [5].

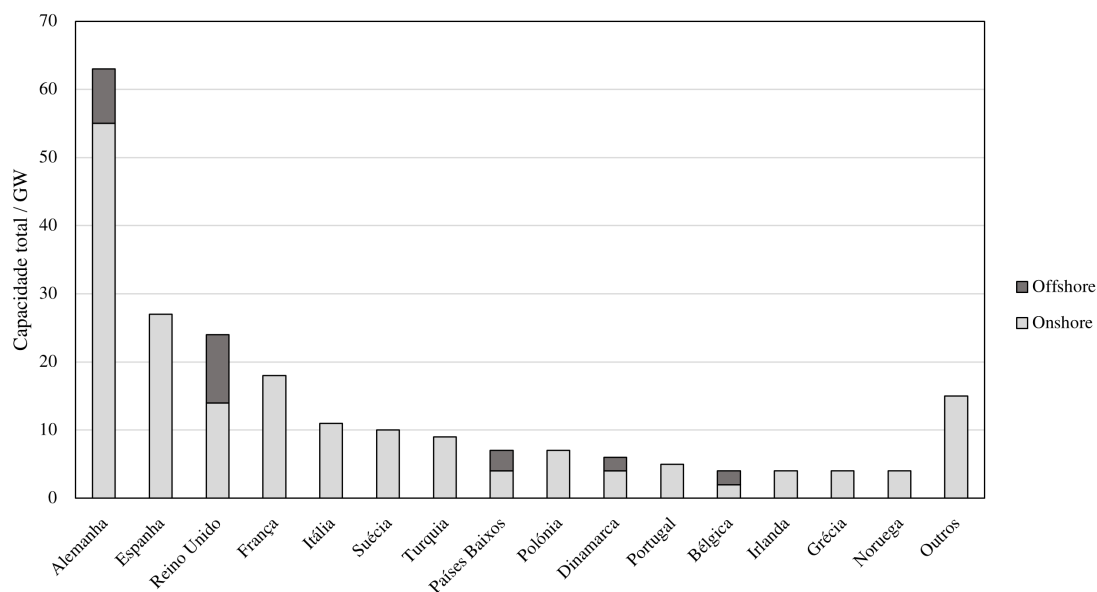


Figura 2.2: Contribuição de cada país para a capacidade total de energia eólica na Europa em 2020. Adaptado de [5].

2.2.1 Acoplamento direto vs Caixa multiplicadora

Existem múltiplas configurações para o sistema de transmissão de um aerogerador, sendo que a configuração mais usual utiliza uma caixa multiplicadora entre o rotor e o gerador para aumentar

a rotação de 100 rpm para cerca de 1200 rpm. Nos últimos anos, uma outra configuração tem conquistado terreno nesta área: o acoplamento direto. Este modelo consiste na utilização de um gerador de baixa velocidade, evitando assim a utilização de uma caixa multiplicadora [6]. Estas são as duas configurações mais populares de momento, sendo que cada uma delas possui as suas vantagens. A decisão de qual configuração utilizar depende de fatores financeiros, da localização do aerogerador e da experiência do fabricante [6, 7]. Por este motivo não é possível afirmar que uma configuração é superior à outra. Na tabela 2.1 é possível verificar as principais diferenças entre elas:

Tabela 2.1: Comparação das propriedades principais de aerogeradores entre configurações de acoplamento direto e de caixa multiplicadora. Fonte [6].

Configurações	Acoplamento direto	Caixa multiplicadora
Peso	Maior	Menor
Comprimento	Menor	Maior
Diâmetro	Maior	Menor
Custo	Maior	Menor
Produção	Maior	Menor

Em termos de manutenção, a configuração por caixa multiplicadora é menos fiável pois tem uma ocorrência de avarias mais frequente que a configuração por acoplamento direto. Isto é devido à própria caixa multiplicadora, que é um elemento muito propício a avarias. No entanto a sua manutenção de avarias é relativamente fácil, podendo ser resolvida em poucos dias.

No caso do acoplamento direto, embora as avarias ocorram com menos frequência, são geralmente muito mais graves. Por exemplo, uma avaria nos rolamentos principais pode exigir a paragem do aerogerador durante 1 semana, caso esta seja no frontal, ou 5 meses caso seja no traseiro, devido à dificuldade de montagem desta configuração.

Por este motivo, a presente dissertação foca-se no estudo dos aerogeradores de acoplamento direto, que embora sejam mais fiáveis, possuem baixas com um impacto negativo superior.

2.2.2 Modelos dos aerogeradores

A *Finerge* possui um portfólio de cerca de 700 aerogeradores, em que 263 são de acoplamento direto e são geridos exclusivamente por eles. Nesta dissertação foram analisados 4 modelos de aerogeradores: E70-E4, E82-E1, E82-E2 e o E-92 que correspondem a cerca de 97% das turbinas eólicas acima referidas. Na figura 2.3, pode-se observar a percentagem correspondente a cada modelo. O modelo E70-E4 é o mais antigo sendo que os restantes três, são versões mais recentes deste aerogerador, não havendo alterações cruciais no seu mecanismo. Na tabela 2.2 é possível verificar as principais diferenças nas características de cada modelo.

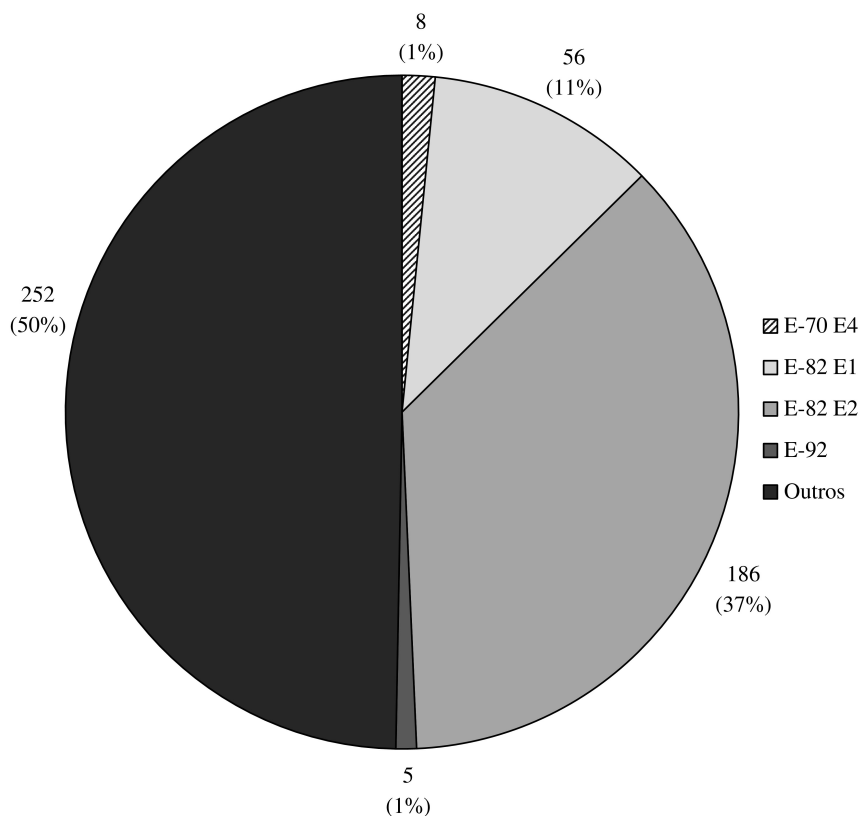


Figura 2.3: Quantidade de aerogeradores de cada modelo.

Tabela 2.2: Principais características para os 4 modelos de aerogeradores. Fontes [8, 9, 10].

Características	E70-E4	E82-E1	E82-E2	E-92
Potência nominal / kW	2300	2300/2000	2300/2000	2350
Diâmetro do rotor / m	71	82	82	92
Comprimento da pá do rotor / m	33,3	38,8	38,8	43,8
Peso de cada pá / t	5,8	8	8	9,5
Peso do rotor completo (sem gerador) / t	42	56	56	56
Peso do gerador / t	47,5	61	61	67
Peso total da nacelle / t	107	136	136	145

2.2.3 Estrutura e modo de funcionamento

Na figura 2.4 observa-se a estrutura dos aerogeradores, que é idêntica para os 4 modelos. Sobre uma torre esguia, cuja forma se torna cada vez mais estreita com a altura, encontra-se a nacelle, que roda em torno do eixo da torre e que é composta pela casa das máquinas e pela cabeça do

rotor. Na cabeça do rotor encontram-se instaladas as três pás do rotor. A posição das pás pode ser ajustada através da rotação em torno do seu eixo longitudinal. A parte fixa do gerador (gerador-estator) pertence à casa das máquinas. A parte rotativa do gerador (gerador-rotor) está diretamente acoplada à cabeça do rotor sem qualquer sistema de engrenagem. A nacele é revestida por uma cobertura aerodinâmica. Os aerogeradores têm um rotor a barlavento, ou seja, quando se olha para o aerogerador em direção do fluxo de vento, o rotor fica situado em frente à torre. O rotor roda em sentido horário.

O aerogerador orienta sempre a nacele para a direção do vento e procura sempre uma melhor adaptação às condições de vento com rotações variáveis para atingir a melhor eficácia possível. Consequentemente, a tensão e a frequência da corrente gerada pode variar. Através do retificador (na nacele), do inversor e do transformador (na base da torre), prepara-se a corrente para ser fornecida à rede da companhia de eletricidade local [8, 9, 10].

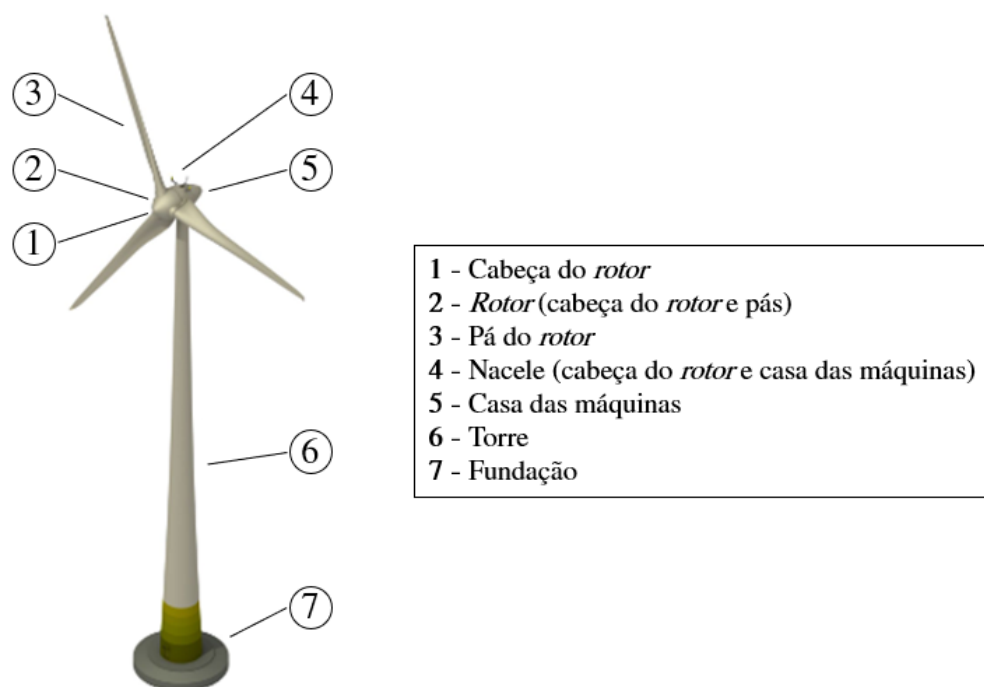


Figura 2.4: Estrutura dos aerogeradores. Adaptado de [8, 9, 10], com a autorização da *ENERCON*.

2.2.4 Rolamentos dos modelos

Os rolamentos principais dos aerogeradores e a sua estrutura mantiveram-se praticamente inalterados ao longo das modificações realizadas entre cada modelo, sendo o seu modo de funcionamento e componentes principais os mesmos. Deste modo utilizou-se o modelo E-82 E2 como referência uma vez que é o modelo com maior número de aerogeradores do portfólio da *Finerge*, observando-se na figura 2.5 os componentes principais da sua nacele.

O *hub* do rotor gira sobre um rolamento de rolos cilíndricos (rolamento do *hub* traseiro) e um rolamento de rolos cônicos de duas filas (rolamento do *hub* frontal) em redor do *axle pin*¹. Este é fixo e encontra-se montado no estator do gerador e suporta o rotor [9]. Estes rolamentos são responsáveis por permitir o movimento de rotação gerador de eletricidade. A nacele é suportada pelo rolamento de *yaw*, que permite a sua rotação no topo da torre através dos dentes do anel exterior. Este encontra-se fixo à torre, já o anel interior do rolamento está fixo à *main carrier*, que é o elemento central de suporte da construção da nacele. Este rolamento serve para ajustar a nacele conforme a direção do vento, colocando as pás numa posição mais eficiente para a geração de energia elétrica [9]. Este movimento de rotação gera um problema devido aos cabos que atravessam a nacele, pois ao girar continuamente estes poderiam ficar danificados devido à sua torção excessiva. Deste modo, o número de voltas seguidas dadas pela nacele são limitadas. Para contornar este problema, os cabos são colocados primeiro numa roldana de deflexão e depois são fixados com *clamps* na parede da torre. Deste modo, os cabos têm espaço de movimento suficiente para permitir a rotação da nacele no seu eixo até três vezes em cada direção, a partir de uma posição neutra, e também podem girar ou torcer-se. Quando a nacele tiver girado mais de duas vezes e menos de três vezes na mesma direção, a partir de uma posição neutra, o sistema de controlo do aerogerador aproveita a próxima oportunidade para destorcer os cabos. Logo que o aerogerador parar por falta de vento, a nacele retrocede três voltas completas na direção oposta. Se não houver falta de vento e a nacele tiver ultrapassado as três voltas, o aerogerador irá parar, independentemente da velocidade do vento e a nacele gira quatro vezes na direção oposta [9].

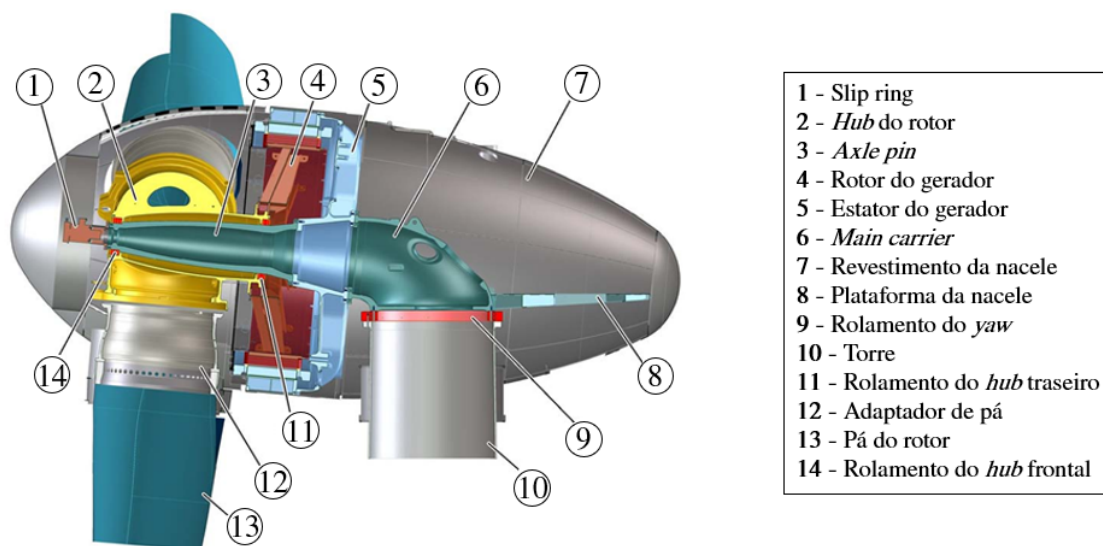


Figura 2.5: Corte transversal da nacele do modelo E-82 E2. Adaptado de [9], com a autorização da *ENERCON*.

Por último existem mais 3 rolamentos, os rolamentos da flange da pá. Estes fazem a união

¹No resto da dissertação o *axle pin* será referido por veio principal.

entre o adaptador das pás e o *hub* do rotor, permitindo a rotação das pás, tal como se observa na figura 2.6. Estes servem para o acionamento de *pitch* que consiste na alteração do ângulo de ataque com o qual o fluxo de ar atinge o perfil da pá. O ângulo destas altera a sua força de sustentação e também a força com a qual as pás fazem girar o rotor. Durante a operação normal (modo automático), o ângulo das pás é ajustado de tal modo que a energia eólica é aproveitada ao máximo sem causar sobrecargas no aerogerador; adicionalmente, este sistema permite também a redução de ruído. O sistema de controlo do *pitch* também permite a travagem aerodinâmica do rotor. Se o aerogerador alcançar a potência nominal e a velocidade do vento continuar a aumentar, o sistema de controlo do *pitch* roda as pás para fora da influência direta do vento, de modo que a velocidade do rotor e a potência obtida do vento transformada pelo gerador não excedam os valores nominais ou apenas o façam ligeiramente [10].

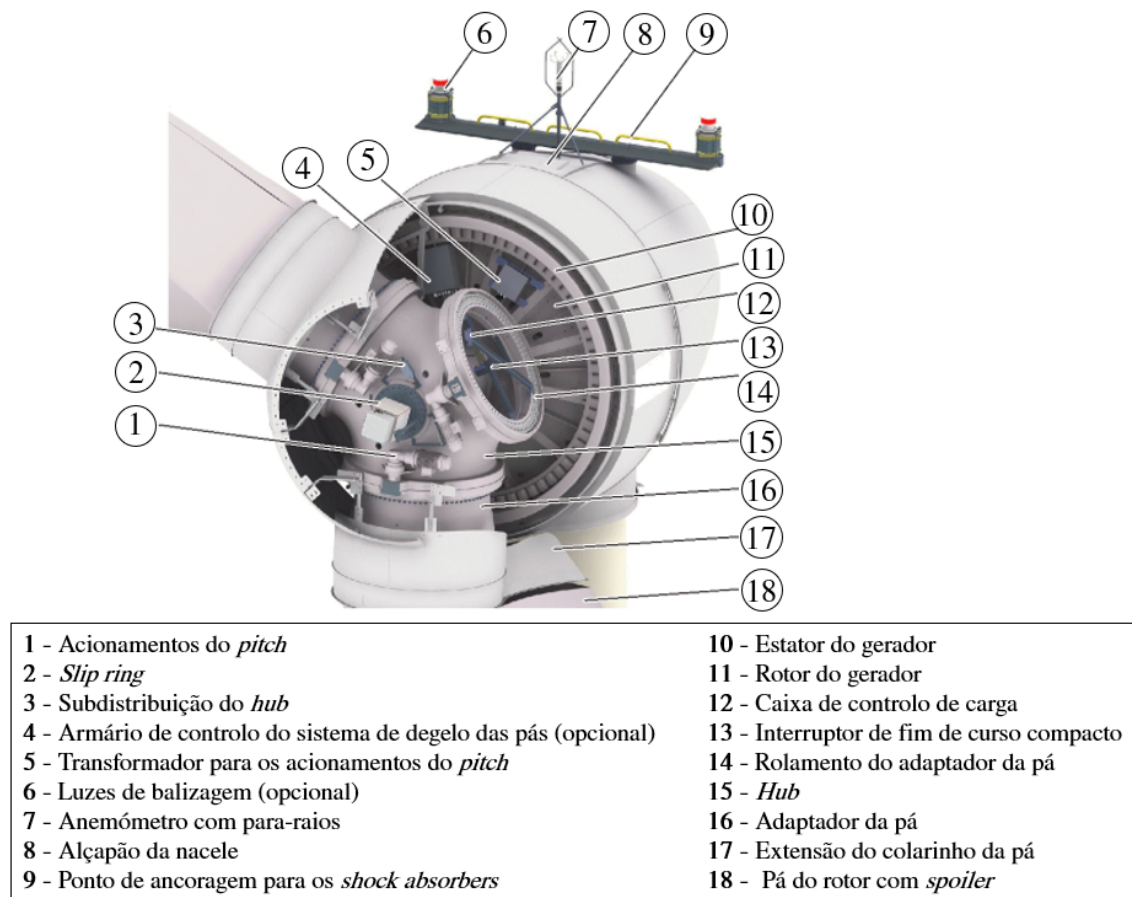


Figura 2.6: Componentes na cabeça do rotor. Adaptado de [9] com a autorização da ENERCON.

2.3 Rolamentos

Os rolamentos são peças que suportam e guiam elementos rotativos ou oscilantes, como eixos ou rodas e transferem as cargas entre os componentes da máquinas. Oferecem atrito reduzido e, por isso, permitem velocidades de rotação elevadas enquanto reduzem o ruído, o calor, o consumo de energia e o desgaste. Os rolamentos são elementos económicos e substituíveis que normalmente seguem padrões de dimensão nacionais e internacionais [11]. Na figura 2.7 é possível observar os componentes de um rolamento.

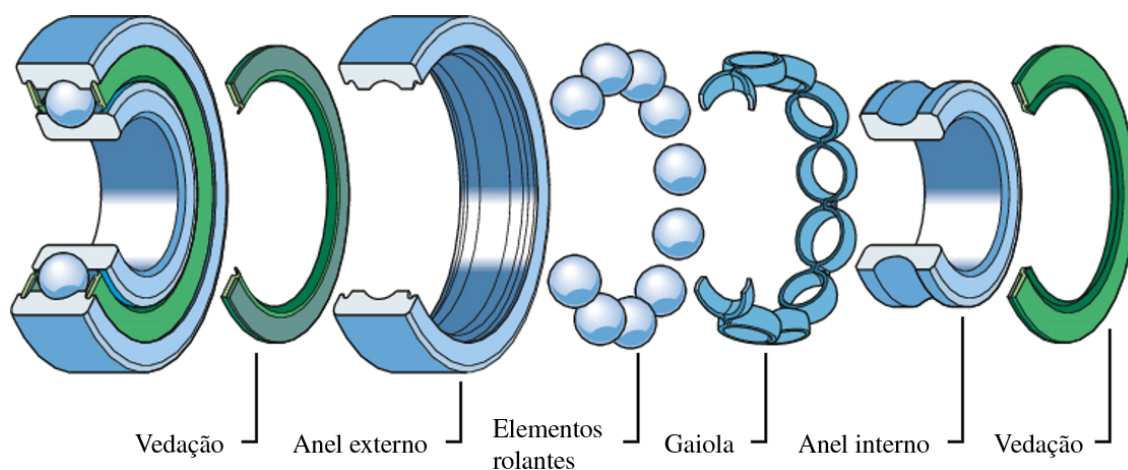


Figura 2.7: Componentes de um rolamento. Adaptado de [12].

2.3.1 Fundamentos

Os rolamentos são classificados por 2 características principais:

- A direção da carga a que estão sujeitos, podendo ser radiais ou axiais. Os rolamentos radiais possuem um ângulo de contacto entre os 0° e 45° enquanto que os axiais possuem entre os 45° e 90° .
- O tipo de elementos rolantes, sendo estes esferas ou rolos. Os rolamentos de rolos possuem uma maior capacidade de carga em comparação com os rolamentos de esferas, no entanto, estão sujeitos a uma maior fricção e deslizamento, não podendo atingir velocidades de rotação muito elevadas.

Os elementos rolantes têm a função de transmitir as cargas incidentes sobre um anel de rolamento ao outro. A carga é transmitida segundo a direção das linhas de contacto, em que o ângulo de contacto, α , é o ângulo formado por estas linhas e pelo plano radial do rolamento, figura 2.8. Estes elementos são classificados consoante a sua forma, podendo observar-se as suas variâncias na figura 2.9. A capacidade de carga de um rolamento depende do número e do tamanho dos elementos rolantes, bem como do seu diâmetro [13, 14].

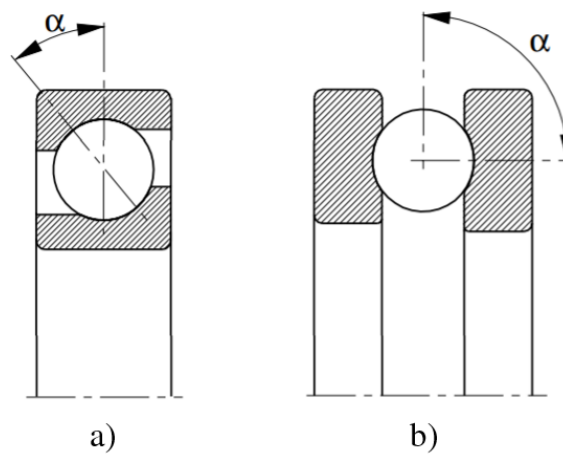


Figura 2.8: Ângulo de contacto para rolamentos radiais (a) e axiais (b). Adaptado de [14].

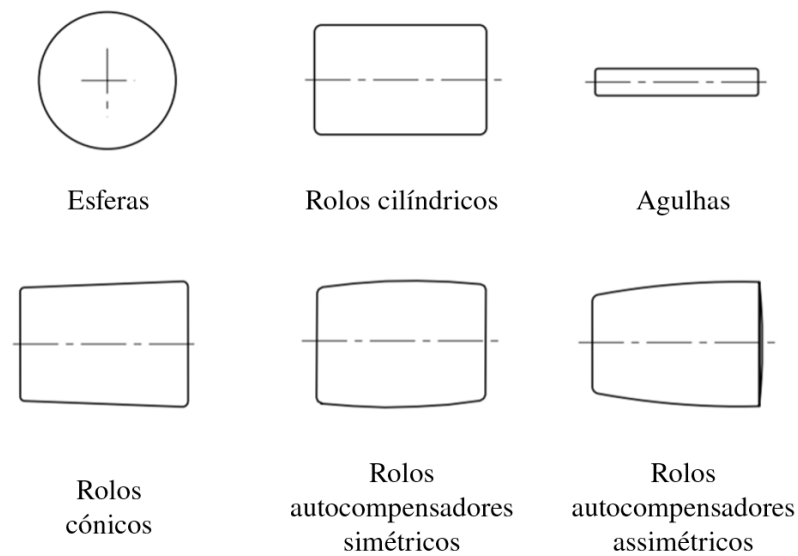


Figura 2.9: Tipos de elementos rolantes. Adaptado de [14].

Os anéis têm a função de guiar os elementos rolantes na direção de rotação. Os anéis contêm ranhuras nas pistas, rebordos e superfícies inclinadas de forma a transmitir os esforços axiais para a direção transversal, figura 2.10 [13].

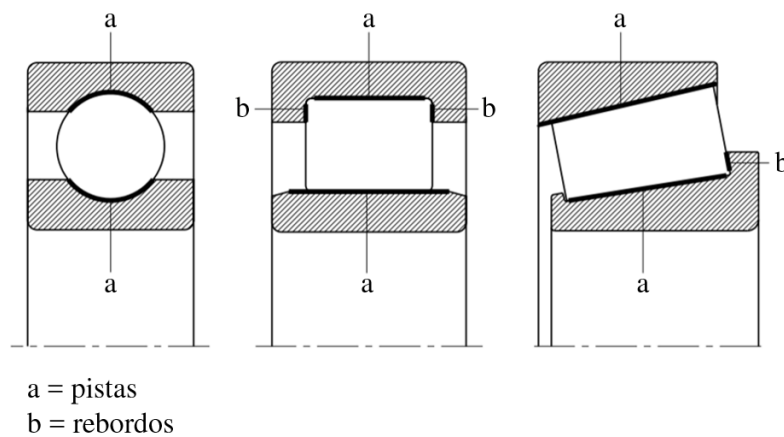


Figura 2.10: Detalhes dos anéis de rolamentos. Adaptado de [14].

Se os rolamentos fossem apenas constituídos pelos anéis e pelos elementos rolantes, estes chocavam uns contra os outros provocando danos. Para evitar este problema existem as gaiolas, que garantem um distanciamento equidistante entre os elementos, permitindo assim uma distribuição de carga homogênea.

Existem rolamentos que não utilizam gaiola com o objetivo de acrescentar elementos rolantes no espaço adicional poupado, aumentando assim a capacidade de carga. No entanto é reduzido o número de rotações permitidas devido ao atrito gerado resultante. Este tipo de rolamentos são uma exceção, pelo que a não utilização de gaiola é incomum [13].

Geralmente seleciona-se a gaiola em função do preço, no entanto em casos mais específicos e exigentes, é necessário ter em conta o seu material, forma e método de guiamento. Na figura 2.11 é possível verificar os 3 tipos de guiamentos existentes.

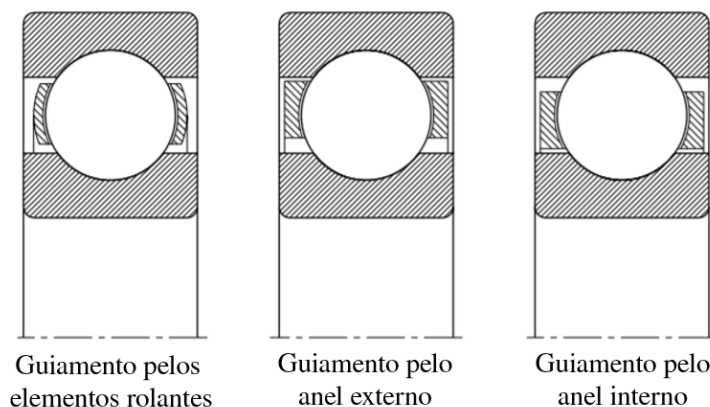


Figura 2.11: Tipos de guiamento das gaiolas. Adaptado de [14].

As vedações e blindagens são peças que encaixam nas ranhuras do anel externo que têm como função proteger o rolamento de contaminação externa e evitar a perda de lubrificante. Estas causam um impacto significativo nos rolamentos uma vez que provocam atrito, pelo que a sua seleção

tem de ser feita de forma meticulosa. As vedações são discos de borracha enquanto que as blindagens são discos metálicos estampados. Estes proporcionam uma opção com atrito reduzido mas a um preço superior.

2.3.2 Lubrificação

A lubrificação é um princípio fundamental para o funcionamento fiável e duradouro dos rolamentos, sendo que a lubrificação incorreta é responsável por mais de 36% das falhas precoces em rolamentos [15]. A lubrificação tem como função:

- Formar uma membrana entre as superfícies de contacto que é capaz de suportar cargas, prevenindo assim desgaste e fadiga prematura;
- Dissipar calor em caso de lubrificação por óleo;
- Isolar o rolamento de contaminantes externos em caso da lubrificação por massa;
- Reduzir o ruído do funcionamento do rolamento;
- Proteger o rolamento contra a corrosão.

Existem dois tipos de lubrificantes: óleo e massa. Existe ainda um caso especial, embora não muito usual, que é o uso de lubrificantes sólidos. Este é utilizado em casos de condições de operação extremas como por exemplo, temperaturas muito elevadas ou vácuo. O tipo de lubrificante a ser usado num determinado rolamento deve ser definido o mais cedo possível durante a sua projeção. Para fazer a seleção do tipo de lubrificante é necessário ter em consideração as condições de operação, o tipo e tamanho do rolamento, o sistema de lubrificação e a construção em redor do rolamento.

A massa é utilizada em casos de rolamentos com uma vida nominal elevada e possui uma necessidade de manutenção reduzida sendo que em certos casos pode ser possível aplicar de início uma lubrificação que dura a vida toda do rolamento. Este tipo de lubrificante não garante dissipação de calor. Nos casos que seja necessário relubrificar os rolamentos, estes têm de possuir zonas de recolhimento da massa antiga e condutas de alimentação.

O óleo é utilizado para casos de cargas e velocidades de rotação elevadas. Possui uma melhor distribuição e fornecimento às áreas de contacto em comparação com a massa. No entanto requer mais atenção em termos de selagem do rolamento. Reduz bastante o atrito com quantidades mínimas de óleo [16].

Relativamente ao sistema de lubrificação, as linhas de alimentação devem ser individuais e o mais curtas possíveis, sendo ligadas diretamente ao rolamento.

O tipo de lubrificante utilizado pela *ENERCON* nos modelos em análise é massa. A utilização de um determinado tipo de massa tem de ser compatível com as temperaturas de operação do rolamento, as condições de pressão, a velocidade de rotação e a presença de humidade na zona de operação. Deste modo, é necessário seleccionar a massa adequada tendo em conta que as suas

propriedades variam consoante o óleo de base e a sua viscosidade (importante para definir a gama de velocidades de funcionamento), o espessante e os aditivos [16].

2.3.3 Falhas

Existem uma série de causas que podem provocar a falha prematura de um rolamento. Na figura 2.12 observa-se o resultado de um estudo realizado pela *SKF* de forma a tentar perceber quais os principais motivos de avarias em rolamentos.

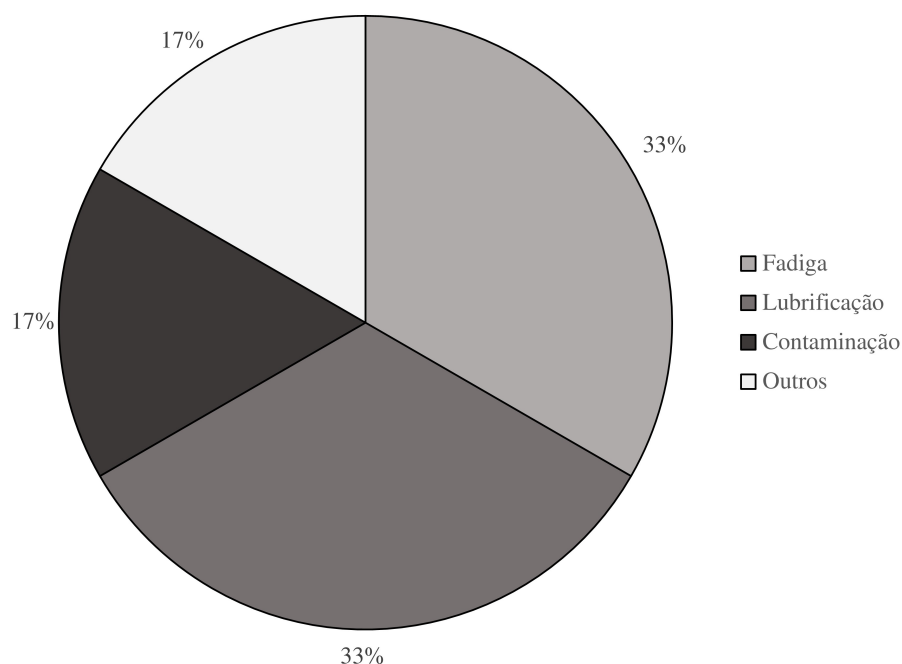


Figura 2.12: Motivos de avaria de rolamentos. Fonte [17]

A norma ISO 15243:2004 é utilizada para classificar os danos em rolamentos baseando-se em 3 características principais, limita-se a danos causados durante o serviço do rolamento (não inclui falhas como por exemplo: erros no fabrico do rolamento, danos no transporte do mesmo ou na sua colocação, falhas estas que estão consideradas na secção "Outros" da figura 2.12), a formas características de mudança na aparência que possam ser atribuída a causas específicas com alto grau de certeza (não são classificados casos extremos e improváveis) e restringe-se também a danos que possam ser visíveis por algum meio (visual, microscópico, raio-X, etc.).

Esta norma divide as falhas em 6 categorias principais :

- **Fadiga** - Alteração na estrutura causada pelas tensões cíclicas desenvolvidas nos contactos entre os elementos rolantes e as pistas. Divide-se em fadiga sub superficial e fadiga iniciada na superfície. Ocorre devido à utilização de rolamentos não adequados para a aplicação

e a uma má lubrificação (lubrificante incorreto, quantidade de lubrificante inadequada ou aplicação de lubrificante numa periodicidade inadequada);

- **Desgaste** - É a remoção progressiva de material resultante da interação de duas superfícies de contacto deslizantes ou de deslizamento durante o seu funcionamento. Divide-se em desgaste abrasivo e adesivo. Ocorre devido a uma má lubrificação e à contaminação do rolamento (pode ocorrer no transporte, armazenamento ou devido a uma vedação não apropriada para a aplicação);
- **Corrosão** - É a reação química entre superfícies metálicas que pode provocar oxidação, corrosão e até descascamento dos elementos. Divide-se em corrosão por humidade e por atrito, que por sua vez se divide na corrosão de contacto e no falso brianel. Ocorre devido a uma lubrificação incorreta, contaminação do rolamento e à existência de um assento do rolamento não devidamente maquinado ou ajustado. O falso brianel também pode ser provocado devido a vibrações excessivas, para além dos motivos indicados anteriormente;
- **Pitting elétrico** - É a remoção de material das superfícies de contacto, causada pela passagem de corrente elétrica. Ocorre devido à passagem de corrente pelo rolamento e por tensão excessiva devido a problemas no sistema da ligação terra;
- **Deformação plástica** - Deformação permanente do material que ocorre após a passagem do seu limite de elasticidade. Divide-se em sobrecarga e indentações por partículas. Pode ocorrer devido ao mau manuseamento e montagem dos rolamentos, contaminação ou lubrificação incorreta;
- **Fraturas e fissuras** - A separação incompleta de um material sob condições de tensão denomina-se de fissura. A propagação da fissura até à separação completa de uma parte do componente resulta na fratura do mesmo. As fissuras aparecem quando a tração máxima do material é excedida. Divide-se em fratura forçada, fratura por fadiga e fissuras térmicas. Ocorrem devido à existência de ajustes e tolerâncias mal dimensionados, ao mau manuseamento do rolamento e à temperatura excessiva devido a atrito, que ocorre quando a lubrificação é feita de forma incorreta [18].

2.3.4 Características dos rolamentos dos aerogeradores

Existem vários tipos de rolamentos, sendo que cada um tem as suas vantagens e desvantagens. Deste modo, a seleção do tipo de rolamento é feita conforme o caso da sua aplicação. Os distintos tipos de rolamentos presentes nos modelos dos aerogeradores são:

- **Rolamento frontal: rolamento de rolos cônicos de dupla pista** - O rolamento de rolos cônicos consegue suportar cargas axiais segundo uma direção e aguenta com cargas radiais elevadas. Este normalmente tem de ser montado em conjunto com um segundo rolamento posicionado simetricamente segundo um plano vertical. Por este motivo, normalmente estes

rolamentos são sempre de dupla pista, tal como é o caso do rolamento frontal dos aerogeradores, ou segunda uma montagem especial. Quando o rolamento é de dupla pista, este consegue suportar cargas axiais elevadas em ambas as direções e também momentos (Figura 2.13) [16];

- **Rolamento traseiro: rolamento de rolos cilíndricos** - Este tipo de rolamento é de auto-centragem e é adequado para aplicações com cargas radiais de impacto elevado e situações onde é necessário compensar desalinhamentos. No entanto, possui uma fraca capacidade para suportar cargas axiais (Figura 2.14) [16];
- **Rolamento da flange da pá e de yaw: rolamento de esferas de dupla pista com coroa de orientação** - Os rolamentos das pás e de yaw possuem o mesmo tipo de rolamento, mas com dimensões diferentes. Os rolamentos de esferas são versáteis e robustos, podendo existir a sua versão de dupla pista, tal como é o caso em questão. São indicados para velocidades elevadas e conseguem suportar cargas axiais em ambas as direções, bem como cargas radiais. Utiliza-se dupla pista quando a capacidade de carga de um rolamento de esferas de 1 pista não é capaz de suportar a carga [16]. A coroa de orientação implica que o anel externo ou interno possui uma engrenagem. Esta, em conjunto com os furos de fixação possibilitam uma transmissão de potência otimizada com uma conexão simples e rápida entre componentes adjacentes da máquina [19]. Para ambos os casos, a zona de engrenagem é o anel externo. O sistema de controlo de *pitch* permite realizar a rotação do rolamento de flange de pá, controlando assim a rotação das pás do aerogerador. O sistema de controlo de yaw permite a rotação de todos os componentes da nacelle, uma vez que estes estão de forma direta ou indireta fixados ao *main carrier*, que por sua vez se encontra fixado ao anel interior do rolamento de yaw (Figura 2.15) [8, 9, 10].



Figura 2.13: Rolamento frontal do modelo E-82 E2: rolamento de rolos cónicos de dupla pista. Autoria de imagem: *Finerge*



Figura 2.14: Rolamento traseiro do modelo E-82 E2: rolamento de rolos cilíndricos. Autoria de imagem: *Finerge*



Figura 2.15: Rolamento de yaw do modelo E-70 E4: rolamento de esferas de dupla pista com coroa de orientação.

2.4 Técnicas de análise de falhas

A ocorrência de avarias em equipamentos está associada a prejuízos e a riscos de segurança pelo que estas são sempre indesejáveis. Com o intuito de detetar e mitigar falhas presentes em equipamentos foram desenvolvidas diversas técnicas de análise de falhas. Nesta secção são abordadas 3 tipos de análise utilizadas no desenvolvimento da dissertação.

2.4.1 Análise de dados de vida

A análise de dados de vida refere-se ao estudo da vida de um determinado produto. Consiste na aplicação de modelos de distribuição estatística a registros de operações de uma amostra de uma população do produto em análise que possuam informações relativamente ao tempo de operação do produto com sucesso e o tempo de operação do produto até a ocorrência de uma falha. Esta análise consegue determinar características relevantes da vida do produto como a probabilidade de falha a um determinado tempo de operação, a vida média e a taxa de falha. Esta análise realiza-se em 4 passos:

- Recolha de informação relativa à vida do produto em análise;
- Seleção da distribuição mais adequada para analisar os dados recolhidos;
- Estimativa dos parâmetros adequados para a distribuição e para os dados;
- Geração de gráficos e resultados que permitam analisar as características da vida do produto em análise.

Existem várias distribuições que podem ser utilizadas nesta análise, sendo que cada uma tem a sua devida aplicação. As distribuições mais utilizadas são:

- **Distribuição exponencial** - É usualmente utilizada em componentes ou sistemas que apresentem um taxa de avaria constante;
- **Distribuição de Weibull** - A distribuição Weibull é uma distribuição de confiabilidade de propósito geral usada para modelar a resistência do material, tempos de falha de componentes eletrônicos e mecânicos, equipamentos ou sistemas. Esta é a distribuição utilizada na análise realizada na dissertação.
- **Distribuição normal** - É também uma distribuição para uso geral e é utilizada em tempos de falha de equipamentos eletrônicos e mecânicos simples.
- **Distribuição log-normal** - É uma distribuição utilizada para análises de resistência de materiais, em caso de cargas variáveis em *design* probabilístico e para casos de fadiga.
- **Outras distribuições** - Existem ainda outros tipos de distribuições que não são muito utilizadas devido à sua especificidade como a distribuição de Weibull mixa, a distribuição gama e a gama generalizada, a distribuição logística, a distribuição log-logística e a distribuição de Gumbel.

Existem 3 tipos de distribuição de Weibull, a 3-P, 2-P e 1-P em que o número indicado refere a quantidade de parâmetros utilizados. A distribuição 3-P Weibull é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (2.1)$$

Em que:

$$\begin{aligned}
 f(t) &\geq 0 \\
 t &\geq 0 \\
 \beta &> 0 \\
 \eta &> 0 \\
 -\infty &< \gamma < +\infty
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

O parâmetro η é referente ao parâmetro de escala e define a escala da distribuição, β é referente ao parâmetro de forma e define a forma da distribuição e γ é referente ao parâmetro de localização e define a localização da distribuição no tempo. Os parâmetros são determinados de forma a aproximar a função do modelo estatístico à base dos dados fornecidos.

A distribuição 2-P Weibull é a utilizada nas análises realizadas na dissertação e é obtida assumindo que $\gamma = 0$:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{2.3}$$

A distribuição 1-P Weibull é obtida assumindo que $\gamma = 0$ e que $\beta = C$ em que C é uma constante conhecida:

$$f(t) = \frac{C}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{C-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^C} \tag{2.4}$$

O valor de C é obtido através de registos de produtos idênticos. A distribuição 1-P Weibull permite analisar dados com poucas ou nenhuma falha registada [20].

2.4.2 Análise de modo e efeito de falha

A análise de modo e efeito de falha ou FMEA (*Failure mode and effects analysis*) é uma metodologia projetada para identificar modos de falha para um determinado produto ou processo. Esta análise avalia o risco associado a cada falha e ordena-as em termos de prioridade de risco com o intuito de identificar e definir ações corretivas [21].

A FMEA começa por identificar um determinado tipo de falha, os efeitos que essa falha provoca e as causas que possam provocar a falha indicada. É atribuído um valor de 1 a 10 a cada tipo de efeito consoante a sua severidade e 2 valores de 1 a 10 a cada causa consoante a sua probabilidade de ocorrência e a sua probabilidade de deteção. Os 3 valores atribuídos são multiplicados obtendo-se o NPR, o número de prioridade de risco. Quanto maior for o NPR, maior é a urgência de intervenção numa determinada causa, pelo que as causas são ordenadas consoante o seu NPR. A partir destes valores é possível realizar gráficos e análises pretendidas ao produto ou processo em avaliação.

Este tipo de análise permite a elaboração de tabelas e relatórios onde constam todos os riscos associados, o que possibilita uma análise visual simplista, sucinta e rápida a uma quantidade elevada de informação referente ao caso em estudo.

2.4.3 Análise de causa raiz

A análise de causa raiz ou RCA (*Root cause analysis*) é uma metodologia que consiste em determinar a origem de uma falha e eliminá-la, evitando assim que a mesma falha volte a ocorrer. É um método de manutenção reativa, o que implica que só é possível aplicar após o aparecimento de uma avaria no sistema em análise.

Para o RCA ser eficiente, é necessário definir bem a falha em questão e realizar uma investigação consistente e minuciosa. Por exemplo, ao investigar uma determinada falha pode-se descobrir que esta foi causada pela "Causa A". No entanto a "Causa A" foi provocada pela "Causa B" que por sua vez foi provocada pela "Causa C". Para a obtenção de um RCA eficaz, este não pode acabar na "Causa A", mas sim continuar a investigar os vários níveis de causas da falha até atingir a causa raiz, isto é, a causa original. Ao identificar esta causa, é possível definir procedimentos para a corrigir, evitando assim a ocorrência das restantes causas que por sua vez evita a falha em análise [22].

Este tipo de análise é bastante abrangente devido à variedade de setores onde pode ser aplicado e é extremamente útil, uma vez que elimina falhas recorrentes otimizando assim o valor obtido pelo sistema em análise.

2.5 Métodos de manutenção

Os operadores de centrais eólicas evitam a paragem de turbinas devido aos custos de perda de produção. Relativamente a danos de rolamentos, a menos que estes sejam seriamente graves as turbinas continuam em operação enquanto se procede a operações de monitorização da deterioração do rolamento e considera-se quais os passos a tomar para tentar reduzir a taxa de deterioração e estender a vida do rolamento. Deste modo, os desafios dos sistemas de monitorização da condição dos rolamentos passam por determinar com a maior precisão possível qual o tempo máximo que este pode continuar em operação até ser substituído. Assim, o principal tipo de manutenção a aplicar nos rolamentos de turbinas é a manutenção preditiva [23].

2.5.1 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção que consiste em prever quando irão ocorrer falhas num determinado equipamento em análise. Aplica algoritmos de previsão a dados recolhidos para tentar obter uma previsão de avaria. Com base nessa previsão são geridas as atividades de manutenção necessárias. Funciona segundo as seguintes etapas:

- **Recolha de dados:** Obtenção de dados de qualidade através de sensores que recolhem a informação necessária para as técnicas de manutenção a aplicar, como temperatura ou vibração;
- **Análise de dados:** Sondagem dos dados adquiridos, enviando-os para um sistema central que os analisa;
- **Aplicação de algoritmos:** Aplicação de algoritmos que permitem gerar um prognóstico dos mecanismos, permitindo detetar avarias antes que estas ocorram.

Com a informação obtida é possível fazer uma gestão da manutenção necessária ao equipamento em análise, permitindo mantê-lo em funcionamento o máximo de tempo possível antes da avaria. Desta forma obtém-se um melhor aproveitamento deste e apenas se procede à sua substituição quando é estritamente necessário, elevando assim o seu rendimento ao extremo.

Como referido na secção 2.2.1, uma avaria no rolamento traseiro pode levar à paragem do aerogerador por 5 meses. Esta inatividade é devida aos procedimentos de substituição da *ENERCON* para este tipo de rolamento em específico. Quando este rolamento avaria, a *ENERCON* tem de fabricar um *hub* do rotor novo ou recondicionar um antigo e inserir um rolamento traseiro novo. Por estes motivos, esta avaria provoca custos elevados devido à longa paragem do aerogerador e ao equipamento necessário para proceder à substituição do *hub* do rotor. A aplicação da manutenção preditiva nesta situação possibilita, ao prever quando a avaria irá ocorrer, otimizar o tempo útil do rolamento e colocar uma encomenda antecipada deste, eliminando o tempo de espera de 5 meses. Deste modo os custos são mitigados, obtendo-se um maior valor dos ativos.

O melhor exemplo de manutenção preditiva a aplicar em rolamentos de aerogeradores é a análise de vibrações que permite não só detetar a evolução de uma falha com antecedência de cerca de 1 ano, mas também identificar o tipo de falha consoante os resultados obtidos pela análise. Este tipo de análise é descrita com mais detalhe no capítulo 5.

Devido à exigência de determinar a vida limite do rolamento com precisão, costumam ser aplicados outros tipos de manutenção complementares à análise de vibrações, mesmo que estes não se tratem de tipos de manutenção preditiva. As técnicas mais aplicadas são:

- **Análise do lubrificante** - Realização de análises à massa dos rolamentos para identificar a presença de componentes metálicos devido à degradação do rolamento;
- **Controlo de temperaturas** - Monitorização das temperaturas para acompanhar a evolução das falhas, uma vez que o aumento significativo da temperatura de funcionamento indica a aproximação do fim de vida do rolamento;
- **Análise de emissão acústica** - Controlo acústico que permite identificar a origem da falha como, por exemplo, fricção, más condições de lubrificação e impactos de partículas;
- **Metrologia** - Medição de alinhamentos e posicionamentos dos rolamentos para garantir que estes não se encontram desalinhados, o que pode provocar a deterioração mais rápida destes;

- **Análise de destroços** - Esta inspeção de destroços ocorre após a falha do rolamento mas permite ajudar na identificação do que provocou a sua fratura.

Uma monitorização fiável pode ser assegurada com a aplicação de análises de vibração, análises de emissão acústica e controlo de temperaturas, sendo que os restantes métodos são apenas técnicas de manutenção complementares a aplicar em caso de suspeita de falha [23].

2.6 Conclusões

Neste capítulo abordaram-se todos os conceitos teóricos e assuntos necessários para o desenvolvimento e compreensão das temáticas da dissertação. Com esta preparação inicial é possível dar início à análise do caso de estudo.

Capítulo 3

Análise do caso de estudo

3.1 Introdução

De forma a analisar o caso de estudo, a *Finerge* disponibilizou um documento que continha informações relativas aos seus aerogeradores como data de comissionamento, localização, componentes avariados, data de avarias, tempo de paragem devido a uma falha, etc.

Neste capítulo é feita uma análise aos dados obtidos após a filtragem do documento, de forma a tentar perceber o ponto de situação do caso de estudo, isto é, relativamente às avarias de rolamentos para os aerogeradores de interesse. De seguida, aplica-se uma análise de Weibull para obter a probabilidade de ocorrência de falhas em cada componente. Por último realiza-se uma análise de modo e efeito de falha (FMEA) que permite concluir quais os modelos e componentes mais críticos com maior urgência de intervenção.

3.2 Manutenção atual

A manutenção atual dos aerogeradores é realizada pelo fabricante, *ENERCON*, e é um processo complexo que pode ser consultado no manual de manutenção específico para cada aerogerador. Esta operação consiste em verificar inúmeros aspetos da turbina desde as componentes elétricas às mecânicas das suas variadas zonas, como a base da torre, o elevador, a nacele, entre outras [24].

No entanto, a manutenção dos rolamentos em si é bastante insatisfatória, passa apenas por uma análise visual ao lubrificante dos rolamentos para verificação da presença de partículas metálicas. Caso estas sejam identificadas, significa que o rolamento já se encontra gravemente danificado e é necessário proceder à suspensão da atividade do aerogerador e à substituição do elemento. A *Finerge* considera este método de manutenção insuficiente, pois trata-se de uma manutenção muito superficial e sem a possibilidade de efetuar manutenção preditiva. Esta ocorre apenas de 6 em 6 meses e devido a ser uma manutenção apenas preventiva, implica que, neste intervalo de tempo, caso um dos rolamentos principais (frontal ou traseiro do veio principal) avarie, haja a possibilidade dos danos de um dos rolamentos serem extrapolados para o outro.

No caso de elementos com caixa multiplicadora, este acaba por ser o elemento mais crítico. Porém, em aerogeradores de acoplamento direto, os elementos mais críticos passam a ser os rolamentos, pelo que a sua manutenção tem de ser rigorosa e eficiente.

Devido à falta de uma manutenção rigorosa e eficiente e com o intuito de suplementar a manutenção fornecida pela *ENERCON*, a *Finerge* começou a monitorizar a temperatura de aerogeradores através do SCADA para controlar os rolamentos e atuar mais atempadamente em caso de avaria. No entanto, após entrar em contacto com as duas empresas principais fabricantes de rolamentos, a *Schaeffler* e com a *SKF*, revelou-se que quando os rolamentos possuem uma temperatura acima do normal já se encontram com danos graves. Isto implica que este método continua a não ser suficiente uma vez que apenas consegue evitar a transmissão de danos de um rolamento para o outro, dado que caso ocorra uma falha grave, esta não necessita de esperar pela próxima manutenção da *ENERCON* para ser detetada.

Na tentativa de otimizar a manutenção atual, a *Finerge* procura explorar a possibilidade da aplicação de manutenção preditiva, com o intuito de criar equipas técnicas especializadas. Deste modo, iniciou dois projetos piloto para averiguar a eficiência da utilização de análise de vibrações para detetar atempadamente o aparecimento de falhas nos rolamentos, projetos estes descritos com mais detalhe no capítulo 5.

Por último, é de notar que apenas foram realizados dois relatórios de análise de causa raiz (RCA) aos rolamentos que apresentaram falhas indicados na secção seguinte, sendo que ambos os relatórios são referentes à mesma falha em que 1 dos relatórios foi realizado pela *ENERCON* e o outro foi elaborado por uma empresa externa contratada pela *Finerge*. O número praticamente inexistente destes relatórios é devido à pouca acessibilidade e disponibilidade que o fabricante apresenta à *Finerge*. Isto apresenta uma falha grave pois, deste modo, não é possível detetar o que provoca a falha de um rolamento, limitando assim a capacidade de otimizar a manutenção destes.

3.3 Histórico de falhas

Em primeira instância, foi necessário realizar uma filtragem da informação do documento, uma vez que incluía dados relativos a 432 turbinas, sendo que apenas 255 se referiam aos modelos de interesse, tal como se observa na figura 2.3. O documento é referente às avarias ocorridas entre o ano de 2012 e 2020, sendo que a *Finerge* possui 25 avarias dos rolamentos dos modelos em estudo neste intervalo de tempo, em que 21 deles ocorreram em aerogeradores distintos (Figura 3.1). Na tabela 3.1 encontra-se registado a quantidade de aerogeradores para cada modelo bem como a sua idade média e na tabela 3.2 é possível verificar as avarias ocorridas.

Tabela 3.1: Quantidade e idade média para cada modelo dos aerogeradores.

	E-70 E4	E-82 E1	E-82 E2	E-92
Nº de aerogeradores	8	56	186	5
Idade média / ano	15,65	12,36	10,31	10,18

Tabela 3.2: Registro dos aerogeradores com avarias nos rolamentos.

Modelo	Nº de série	Parque eólico	Comissionamento	Data da falha	Idade na falha / ano	Falha
E-70 E4	702348	Capucha	20/06/2005	06/08/2012	7,13	Rolamento frontal
E-70 E4	702349	Capucha	17/06/2005	11/06/2012	6,99	Rolamento frontal
E-70 E4	702658	Videira	11/01/2006	12/09/2017	11,68	Rolamento frontal
E-70 E4	702660	Videira	17/01/2006	27/01/2020	14,04	Rolamento frontal
E-82 E1	82108	Azinheira	16/02/2007	19/06/2017	10,35	Rolamento de yaw
E-82 E1	82112	Azinheira	27/04/2007	26/07/2018	11,25	Rolamento frontal
E-82 E1	82164	Almargem	26/06/2007	18/05/2020	12,90	Rolamento frontal
E-82 E1	82165	Almargem	17/07/2007	10/10/2019	10,18 e 12,24	Rolamento frontal + traseiro
E-82 E1	82166	Almargem	03/07/2007	10/04/2019	11,78	Rolamento traseiro
E-82 E1	82886	Lagoa D. João e Feirão	28/10/2008	04/09/2014	5,85	Rolamento traseiro
E-82 E1	82891	Lagoa D. João e Feirão	13/11/2008	25/05/2020	11,54	Rolamento frontal
E-82 E1	821037	Sicó	03/03/2009	09/09/2019	Ambos 10,53	Rolamento de yaw + traseiro
E-82 E1	821038	Sicó	23/02/2009	21/09/2016	7,58	Rolamento de yaw
E-82 E1	821040	Sicó	30/01/2009	06/07/2020	11,44	Rolamento de yaw
E-82 E1	821042	Sicó	23/12/2008	10/10/2016	Ambos 7,80	Rolamento de yaw + traseiro
E-82 E1	822011	Armamar	18/02/2010	09/06/2017	7,31	Rolamento traseiro
E-82 E1	822018	Fonte da Mesa II	15/01/2010	18/09/2015	5,68	Rolamento traseiro
E-82 E2	821925	Arega	06/12/2011	17/05/2017	5,45	Rolamento traseiro
E-82 E2	822006	Armamar	20/05/2010	26/08/2019	9,27	Rolamento frontal
E-82 E2	823490	Sendim	17/06/2011	15/07/2015	Ambos 4,08	Rolamento de pá A + pá B
E-82 E2	823495	Sendim	05/08/2011	27/07/2017	5,98	Rolamento traseiro

Das avarias em grandes componentes registadas no documento, 27% são devidas a rolamentos. Na tabela 3.3 estas encontram-se discretizadas por modelo e tipo de rolamento. Na tabela 3.4 é possível verificar o tempo médio até ocorrer uma avaria num determinado modelo para cada tipo de rolamento.

Tabela 3.3: Incidência de avarias em cada tipo de rolamento pelos diferentes modelos.

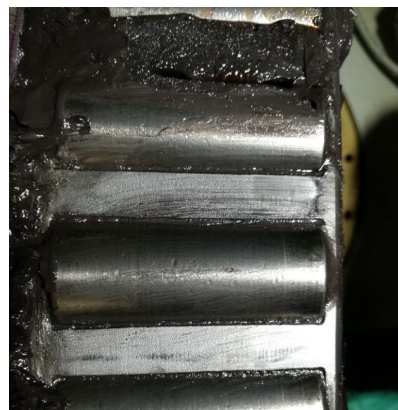
	E-70 E4	E-82 E1	E-82 E2	E-92
Rolamento de pá A	0	0	1	0
Rolamento de pá B	0	0	1	0
Rolamento de pá C	0	0	0	0
Rolamento frontal	4	4	1	0
Rolamento traseiro	0	7	2	0
Rolamento de yaw	0	5	0	0
Total de avarias	4	16	5	0
Taxe de incidências / %	50,00	28,57	2,69	0,00

Tabela 3.4: Tempo médio até falha de cada tipo de rolamento por modelo (em anos).

	E-70 E4	E-82 E1	E-82 E2	E-92
Rolamento de pá A	-	-	4,08	-
Rolamento de pá B	-	-	4,08	-
Rolamento de pá C	-	-	-	-
Rolamento frontal	9,95	11,46	9,27	-
Rolamento traseiro	-	8,74	5,71	-
Rolamento de yaw	-	9,53	-	-



(a) Fadiga iniciada na superfície do anel externo.



(b) Indentações por partículas.

Figura 3.1: Vestígios de danos em rolamentos traseiros. Autoria da imagem: *Finerge*.

É também importante verificar qual a implicação no funcionamento do aerogerador quando um determinado rolamento avaria. Deste modo, na tabela 3.5 observa-se, em média, o tempo de paragem em dias que cada rolamento provoca quando avaria.

Tabela 3.5: Tempo médio de paragem do funcionamento do aerogerador em dias em caso de avaria de cada tipo de rolamento por modelo.

	E-70 E4	E-82 E1	E-82 E2	E-92
Rolamento de pá A	-	-	3	-
Rolamento de pá B	-	-	3	-
Rolamento de pá C	-	-	-	-
Rolamento frontal	8,5	8,25	6	-
Rolamento traseiro	-	165	112	-
Rolamento de yaw	-	16,33	-	-

De um total de 23 parques eólicos apenas 10 possuem avarias, pelo que de modo a tentar verificar a existência de alguma relação com a zona onde se encontram situados os aerogeradores, foi analisada a distribuição das avarias pelos parques eólicos da *Finerge*, tabela 3.6.

Tabela 3.6: Incidências de avarias por parque eólico.

Parques	Nº de turbinas	Nº de incidências	Taxa de incidência / %
Capucha	5	2	40,00
Videira	3	2	66,67
Almargem	3	3	100,00
Armamar	15	2	13,33
Azinheira	7	2	28,57
Fonte da Mesa II	5	1	20,00
Lagoa D. João e Feirão	17	2	11,76
Sicó	10	4	40,00
Arega	2	1	50,00
Sendim	20	2	10,00

Analisando a tabela 3.3 verifica-se que a percentagem de incidências de avarias diminui com a evolução do modelo. Nota-se claramente uma taxa de avarias elevada para os modelos E-70 E4 e E-82 E1, que é corrigida nos seguintes modelos, uma vez que para o modelo E-82 E2 apenas ocorreram 5 avarias em 186 aerogeradores. Relativamente ao modelo E-92, este não apresenta nenhuma avaria, no entanto é de notar que apenas existem 5 aerogeradores deste tipo. Averiguando a idade média das turbinas dos últimos 2 modelos na tabela 3.1 e comparando com a tabela 3.4, verifica-se que já passaram a média de idades para o aparecimento de falhas relativamente aos modelos anteriores, com exceção para o rolamento frontal.

Em relação aos parques eólicos, realizou-se esta análise de forma a tentar perceber alguma relação entre a localização das turbinas de modo a que se possa justificar o aparecimento de falhas. O interesse desta análise surgiu após uma reunião com um engenheiro da 8.2, um empresa internacional perita em consultoria e inspeções técnicas de turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e de biogás. Verificou-se a possibilidade de haver um problema de dimensionamento dos rolamentos, uma vez que os mesmos modelos apresentam menores taxas de falha em países como a Alemanha em comparação com países que estão sujeitos a ventos mais turbulentos como no Brasil e em Portugal. No entanto o representante da 8.2 reforçou que se trata apenas de uma possibilidade, uma vez que rolamentos são peças de desgaste, havendo inúmeras razões para a ocorrência de avarias nestes.

Averiguando a tabela 3.6 verifica-se que os parques de Capucha, Videira, Almargem e Sicó apresentam uma taxa de incidência elevada considerando a quantidade de turbinas em cada um destes parques. Tal pode ser devido a condições atmosféricas mais agrestes nestas zonas. Por este motivo, no capítulo 4 são considerados estes parques eólicos para uma análise mais detalhada aos aerogeradores. Por último, considerando a tabela 3.2 verifica-se que todos os aerogeradores do parque de Sicó apresentam danos no rolamento de *yaw*. Analisando as datas de comissionamento observa-se que todos estes foram construídos num intervalo de aproximadamente 3 meses, o que implica que possa ter havido contaminação dos rolamentos, uma vez que para este intervalo de tempo é possível que tenham sido todos armazenados em conjunto. Outra possibilidade poderá ser alguma falha no transporte ou manuseamento deste durante a instalação. A mesma teoria pode ser aplicada para os parques de Capucha, Videira e Almargem, uma vez que o comissionamento destes têm um intervalo de 3, 6 e 23 dias, respetivamente, e são referentes ao mesmo tipo de rolamentos entre si (rolamentos frontais para os parques de Capucha e Videira e rolamentos frontais e traseiros para o parque de Almargem). É de frisar que não havendo relatórios RCA para estes rolamentos, esta situação apenas se trata de uma suposição, não sendo possível confirmá-la, sendo que também não há informações por parte do fabricante relativas ao armazenamento e transporte destes.

3.3.1 Implicações financeiras

Como referido na secção anterior, ocorreram um total de 25 avarias de rolamentos num total de 255 turbinas eólicas. Das 25 avarias, 21 delas foram em turbinas eólicas distintas. Isto é, 4 turbinas tiveram problemas em mais que 1 rolamento, sendo que em apenas num destes casos, os rolamentos avariaram em momentos distintos ou a substituição de um dos rolamentos foi realizada de forma preditiva. Deste modo, entre 2012 e 2020 foi suspensa a atividade dos aerogeradores em 22 ocasiões distintas. Estas paragens trazem impactos negativos, pois tratam-se de momentos em que os aerogeradores não se encontram disponíveis para produzir energia, havendo perdas de produção e eventuais custos de manutenção (dependendo do tipo de contrato de O&M em vigor). A *Finerge* possui um contrato de operação e manutenção com o fabricante, denominado de EPK II que indica que no caso de avaria de um grande componente, o fabricante é responsável pelo fornecimento do componente danificado e pelo trabalho de substituição enquanto que a *Finerge* é

responsável pelo seu transporte e pelos equipamentos de elevação necessários para a sua substituição (Como guias, figura 3.2). O único rolamento que não necessita de guias para se proceder à sua substituição é o frontal, uma vez que esta operação pode ser realizada dentro da nacele.



Figura 3.2: Grua para remoção da cabeça do rotor. Autoria da imagem: *Finerge*.

Deste modo, considerando que cada aerogerador tem 6 rolamentos, o que resulta num total de 1530 rolamentos em 255 aerogeradores, a ocorrência de 25 avarias entre 2012 e 2020 aparenta ser um taxa bastante reduzida. No entanto, associando os custos de indisponibilidade da turbina e de manutenção, rapidamente se verifica que cada suspensão de atividade do aerogerador acarreta um elevado prejuízo para a empresa.

De modo a perceber o impacto que cada falha no rolamento apresenta, analisa-se a tabela 3.5, onde se verifica que a suspensão da atividade do aerogerador pode ser de apenas 3 dias para rolamentos de pá, entre 6 e 8 em caso de rolamentos frontais, 16 para o rolamento de *yaw* e no pior dos casos, entre 4 e 5 meses para os rolamentos traseiros. É de notar que os tempos referidos tratam-se de uma média baseada nos casos registados de avarias e que não existe um tempo fixo de paragem por avaria de cada rolamento para um modelo específico. Este intervalo de tempo é influenciado pela existência de stock dos rolamentos e das condições atmosféricas favoráveis pois as operações de substituição só podem ser realizadas numa data em que seja garantido condições de segurança para os operadores.

Verifica-se que o tempo de paragem do rolamento traseiro é muito superior em comparação com os restantes rolamentos devido à dificuldade de troca deste. Para este rolamento ser substituído, a *ENERCON* tem de construir ou recondicionar um novo *hub* do rotor, onde é inserido o novo rolamento. De seguida, é enviado para o aerogerador danificado, onde se retira o *hub* do rotor antigo e substitui-se pelo novo, sendo o antigo enviado de volta para as fábricas da *ENERCON* (Figuras 3.3, 3.4 e 3.5). Após a substituição, o aerogerador pode voltar a entrar em funcionamento.



Figura 3.3: *Hub* do rotor com o veio principal, adaptadores de pá e revestimento da cabeça do rotor. Autoria da imagem: *Finerge*.



(a) Conjunto *hub* do rotor + veio principal.



(b) Desacoplamento do conjunto.

Figura 3.4: Desacoplamento entre o veio principal e o *hub* do rotor na fábrica *ENERCON*. Autoria da imagem: *Finerge*.



(a) Rolamento traseiro inserido no veio principal.



(b) Remoção do rolamento traseiro.

Figura 3.5: Remoção do rolamento frontal do veio principal na fábrica *ENERCON*. Autoria da imagem: *Finerge*.

Os modelos E-70 E4, E-82 E1 e E-82 E2, têm uma potência nominal de 2000/2300 kW, sendo que a percentagem de potência produzida é de aproximadamente 30% tendo em conta a flutuação da velocidade do vento. Sabe-se ainda que o valor médio da venda de energia é de, aproximadamente, 75€/MWh, o que implica que num dia estas turbinas rendem cerca de 1242€. Juntando esta informação com a da tabela 3.5, é possível estimar o valor de perdas causada por uma avaria de cada tipo de rolamento, tabela 3.7.

Tabela 3.7: Valor médio da perda produção em € provocado por cada tipo de rolamento para os diferentes modelos.

	E-70 E4	E-82 E1	E-82 E2	E-92
Rolamento de pá A	-	-	3 726,00	-
Rolamento de pá B	-	-	3 726,00	-
Rolamento de pá C	-	-	-	-
Rolamento frontal	10 557,00	10 246,50	7 452,00	-
Rolamento traseiro	-	204 930,00	139 104,00	-
Rolamento de yaw	-	20 727,00	-	-

Para além do prejuízo que advém da perda de produção de energia existem ainda os custos associados ao transporte dos rolamentos e ao aluguer das gruas para as operações de substituição de componentes. Estes custos estão representados na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Custos associados ao transporte e aluguer de guas para cada tipo de rolamento.

	Custo de transporte / €	Custo de aluguer das guas / €
Rolamento de pá	1 100,00	15 000,00
Rolamento frontal	-	-
Rolamento traseiro	39 500,00	35 000,00
Rolamento de yaw	1 100,00	45 000,00

Os custos de transporte são mais elevados para o rolamento traseiro, uma vez que este é o único que exige o transporte do *hub* do rotor entre as fábricas do fabricante na Alemanha e a localização da turbina. Relativamente ao custo de aluguer das guas, este é referente ao tempo necessário para operação de substituição e ao tipo de grua necessária. Os tempos médios estimados para as intervenções de substituição foram de 4, 7 e 9 dias para os rolamentos de pá, traseiro e de yaw, respetivamente. Para a substituição do rolamento traseiro (*hub* do rotor) e do rolamento de yaw, é necessária a utilização de guas de maior capacidade (400 a 500 toneladas), pelo que os custos das intervenções de substituição são superiores. O rolamento frontal não tem custos associados, uma vez que a sua substituição pode ser realizada no interior da máquina e não necessita de guas nem há necessidade de um transporte especial para este rolamento.

É de referir ainda que, para os seguros associados aos parques eólicos do grupo *Finerge* com contratos EPK II, existe uma franquia de 50 000,00 € para os custos totais de transporte e aluguer de guas. Este valor é sempre excedido no caso de avaria do rolamento traseiro visto que os custos deste excedem o valor da franquia, limitando assim os custos da *Finerge* a este valor. Para além destes rolamentos, existem ainda 2 casos de avarias que excederam o valor da franquia. Na tabela 3.2 observa-se que os aerogeradores com o número de série 821042 e 821037 tiveram uma substituição do rolamento traseiro e de yaw no mesmo dia, pelo que para estes casos em específico também é excedido o valor da franquia.

Com estas informações e os dados das tabelas 3.7 e 3.8 é possível obter os custos totais das 25 falhas de rolamentos ocorridas entre 2012 e 2020:

Tabela 3.9: Prejuízo total causado pelas 25 avarias ocorridas entre 2012 e 2020.

	Paragem de produção / €	Transporte e guas / €	Total / €
E-70 E4	42 228,00	0,00	42 228,00
E-82 E1	1 579 131,00	488 300,00	2 067 431,00
E-82 E2	293 112,00	132 200,00	425 312,00
E-92	0,00	0,00	0,00
Total / €	1 914 471,00 €	620 500,00 €	2 534 971,00 €

É de referir que estes valores retratam uma aproximação uma vez que foram assumidas algumas simplificações, como o valor da capacidade de potência dos aerogeradores ser 30% da nomi-

nal, algo que não é uma reflexão da realidade pois este valor vai variando consoante a velocidade do vento e a aproximação do tempo de paragem dos aerogeradores para cada rolamento, tal como mencionado previamente. Mesmo tratando-se de uma aproximação é possível obter uma noção do prejuízo que cada paragem causa à empresa e verifica-se que, mesmo que a taxa de incidência de avarias seja reduzida, estas possuem um impacto significativo.

3.4 Análise de fiabilidade para aplicação da distribuição de Weibull

Utilizando os registos de falhas dos aerogeradores, é possível realizar uma análise de fiabilidade aos rolamentos através da aplicação da distribuição de Weibull para determinar a probabilidade de ocorrência de falhas futuras. Para isso recorreu-se à componente Weibull++ do programa *ReliaSoft* que permite obter previsões para a prestação dos rolamentos. A análise foi realizada aplicando uma distribuição 2P-Weibull, a recomendada pelo programa para as bases de dados em questão. Estas continham informações relativas a cada componente de um determinado conjunto de dados. Para cada componente indica-se o seu ID (Número de série do aerogerador para o caso em estudo) e se falhou ou não, indicando o seu tempo de vida quando ocorreu a falha ou o seu tempo de vida atual caso não tenha ocorrido uma falha. Deste modo, fez-se uma análise para cada tipo de rolamento por modelo, tendo sido obtido o tempo de médio de vida esperado e a sua probabilidade de falha para 20 anos, uma vez que é o tempo de vida útil dos aerogeradores. Os dados utilizados para realizar esta análise encontram-se no anexo A e o resultado desta análise na tabela 3.10.

Tabela 3.10: Resultado da análise de fiabilidade para os variados rolamentos.

	Vida média / ano	Probabilidade de falha / %
Rolamento frontal E-70 E4	15,99	72
Rolamento frontal E-82 E1	17,02	86
Rolamento traseiro E-82 E1	24,34	36
Rolamento de yaw E-82 E1	23,3	35
Rolamentos de pás E-82 E2	1329,66	1
Rolamento frontal E-82 E2	26,77	13
Rolamento traseiro E-82 E2	145,95	3

Com a probabilidade de falha determinada é possível fazer uma análise de modo e efeito de falha. Observando a tabela 3.10 verifica-se que apenas os rolamentos frontais para o modelo E-70 E4 e E-82 E1 não têm uma esperança de vida média superior a 20 anos, tendo portanto uma probabilidade de falha superior.

Constata-se que para o modelo E-82 E1, o rolamento traseiro possui uma menor probabilidade de falha do que o frontal mesmo apesar de este possuir maior incidência de avarias, como se pode observar na tabela 3.3. Isto deve-se ao modo como a distribuição de 2P-Weibull analisa os dados,

porque, para além de ter em consideração a quantidade de incidências e a idade da máquina quando estas ocorrem, também considera o intervalo entre avarias.

Por último é de notar que os valores que correspondem ao modelo E-82 E2 são irrealistas e não têm significado. Tal deve-se à existência de poucas falhas para uma quantidade de dados elevada. Isto significa que a análise de fiabilidade não é precisa para este caso em concreto, dado que requer uma taxa de falhas relevante para o tamanho de dados em análise. Poderia-se aplicar uma distribuição 1-P Weibull para este caso e atribuir um valor de β para cada rolamento, no entanto este valor teria de ser baseado nos modelos anteriores e assim iria-se influenciar a análise destes rolamentos. Ao aplicar a mesma distribuição que se aplicou nos modelos anteriores consegue-se concluir que para o modelo E-82 E2 as falhas são associadas a casos soltos que em termos estatísticos não se encontram relacionadas.

3.5 Análise de modo e efeito de falha dos rolamentos

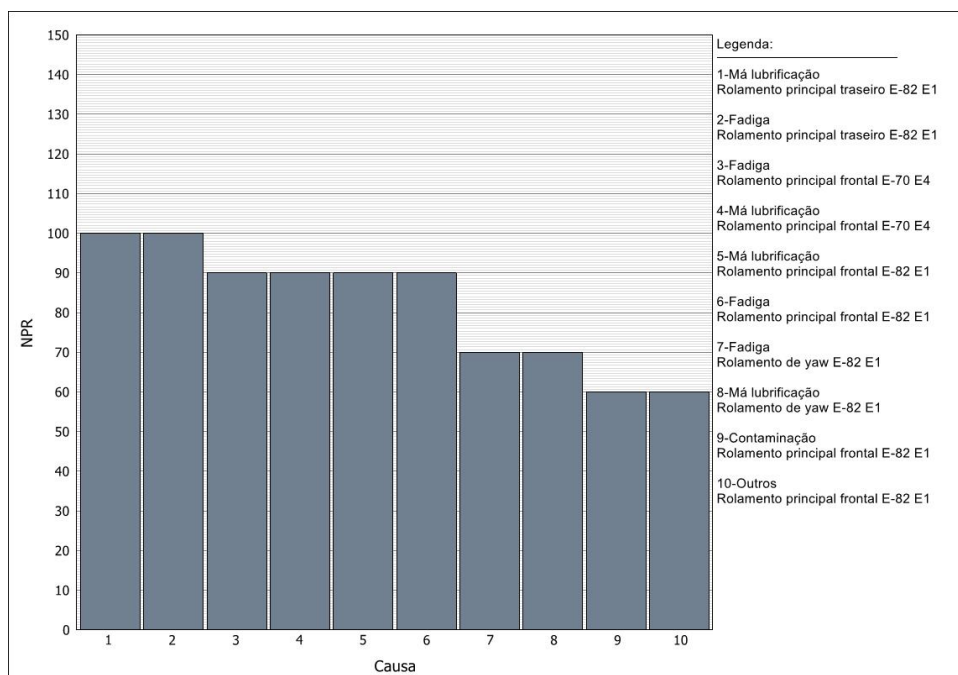
A análise realizada na secção 3.3 embora bastante relevante pode ser aprofundada através de elaboração de um relatório FMEA. Para isso é necessário verificar o grau de severidade no caso de avaria de cada rolamento, bem como a probabilidade de ocorrência de avaria destes, probabilidade esta determinada na secção anterior. Com esta análise é possível averiguar quais os casos mais críticos, isto é, os rolamentos com maior urgência de intervenção.

As análises FMEA foram executadas na componente XFMEA do programa *ReliaSoft*. Foram feitas 4 análises, uma por modelo de aerogerador. Para as análises é necessário indicar qual a falha, qual o efeito da falha e quais as possíveis causas. Devido à não existência de relatórios RCA, não existem informações sobre os tipos de falhas ocorridos nas 25 avarias já registadas. Deste modo, foi considerada uma falha genérica para todos os casos que foi designada como "Rolamento avaria". De seguida indica-se o efeito, que se trata da paragem do aerogerador durante um determinado período de tempo. Este período varia consoante o tipo de rolamento e modelo da turbina, tal como indicado na tabela 3.5. É necessário atribuir um valor de 1 a 10 à severidade (S) deste efeito, que vai ser tanto maior quanto maior for a paragem do aerogerador. Posteriormente indica-se possíveis causas para o aparecimento da falha. Mais uma vez, devido à não existência de análises às falhas ocorridas e por consequente à não existência de informação, as causas consideradas foram as 4 falhas genéricas para rolamentos como referido na subsecção 2.3.3. A cada possível causa atribui-se um valor de 1 a 10 à ocorrência (O), consoante a probabilidade de ocorrência desta determinada causa. Para determinar esta probabilidade, teve-se em consideração 2 fatores: a probabilidade de ocorrência de avarias num tipo de rolamento para um modelo específico e a probabilidade de ocorrência desse tipo de causa nos rolamentos em geral. O primeiro fator foi determinado na secção anterior na tabela 3.10 e o segundo encontra-se indicado na figura 2.12. Por último atribui-se um valor de 1 a 10 à deteção (D), valor este que depende da probabilidade de deteção da causa e foi considerado constante para todos os casos. Na tabela 3.11 é possível averiguar os critérios de escolha para os valores atribuídos às parcelas da severidade e da ocorrência.

Tabela 3.11: Critérios para a atribuição dos valores para a severidade e ocorrência.

Valor a atribuir	S (Tempo de paragem /dia)	O (Probabilidade de ocorrência / %)
1	0	[0,10[
2	1	[10,20[
3	2 a 3	[20,30[
4	4 a 5	[30,40[
5	6 a 7	[40,50[
6	8 a 9	[50,60[
7	10 a 20	[60,70[
8	20 a 40	[70,80[
9	40 a 90	[80,90[
10	>90	[90,100[

Após a introdução dos valores, o programa calcula para todas as causas de falha de cada rolamento, o NPR (Número de prioridade de risco). Quanto maior for este índice, maior é a necessidade de intervenção. No anexo B pode-se consultar os relatórios FMEA executados para cada modelo. Observando a figura 3.6 pode-se observar os 10 maiores índices de NPR para os 4 FMEA executados, podendo determinar-se quais os rolamentos com maior urgência de intervenção.

Figura 3.6: Top 10 causas ranqueadas por NPR. Gráfico criado no programa *ReliaSoft*.

3.6 Conclusões

Por observação da figura 3.6, verifica-se que o caso mais crítico é o rolamentos principal traseiro do modelo E-82 E1, seguido pelo frontal do E-70 E4 que se encontra empatado com o frontal do E-82 E1. Deste modo, no capítulo seguinte é feita uma análise a estes 3 rolamentos em termos de fadiga e de lubrificação incorreta, uma vez que são os problemas mais prováveis de serem os geradores das falhas dos componentes. Tal como se observa na figura 3.1a, este rolamento aparenta danos devido a fadiga iniciada na superfície, que pode ser devido a problemas de dimensionamento incorreto dos rolamentos e de má lubrificação, estando portanto de acordo com a análise efetuada.

No capítulo seguinte não é realizada uma análise em termos de possibilidade de contaminação ou incorreto manuseamento dos rolamentos, visto que para além de não serem os casos mais críticos determinados nas análises FMEA, tratam-se de motivos de falha que são mais dependentes do fabricante dos aerogeradores. No entanto, no capítulo 5, são referidos modos que permitem suprimir estas falhas.

Capítulo 4

Análise dos rolamentos críticos

4.1 Introdução

Neste capítulo é feita uma análise aos 3 rolamentos mais críticos dos modelos em estudo: frontal e traseiro do modelo E-82 E1 e o frontal do modelo E-70 E4. O objetivo passa por verificar se estes se encontram selecionados corretamente, pois em caso de não serem os mais adequados para a sua aplicação, podem ser os responsáveis pela ocorrência das falhas por fadiga, sendo este o foco principal. Em termos de lubrificação é analisado um documento referente ao lubrificante utilizado, uma vez que este não é o recomendado pelo fabricante.

Em última instância faz-se uma análise aos dois RCA realizados a uma das falhas, com o intuito de comparar com as conclusões da análise do dimensionamento e do lubrificante.

4.2 Seleção dos rolamentos

Para fazer uma análise dos rolamentos, idealmente, devem ser utilizados métodos mais rigorosos do que os usados nesta secção, como programas específicos que consigam replicar o caso em estudo com elevada precisão. No entanto, devido à inexistência de acessibilidade a estes programas e à falta de dados por parte do fabricante, a análise realizada nesta secção é considerada rudimentar dado que tiveram de ser feitas bastantes simplificações. Deste modo, a análise executada é considerada apenas um estudo inicial do ponto de situação do dimensionamento dos rolamentos e não deve ser considerada sem ser realizada uma análise mais profunda em que seja possível corrigir as simplificações consideradas.

De forma a averiguar o dimensionamento dos rolamentos é necessário determinar as reações a que estes se encontram sujeitos para comparar com os rolamentos utilizados nos 2 modelos. Assim, é preciso compreender quais as cargas que transmitem esforços para estes e, portanto, o funcionamento do mecanismo de rotação dos aerogeradores. O vento ao atravessar as pás do aerogador provoca forças de sustentação e de arrasto que permitem que estas comecem a rodar em torno do eixo do rotor. As pás estão afixadas ao *hub* do rotor por intermédio de um adaptador de pá. Deste modo, a rotação das pás provoca a rotação do *hub* do rotor que roda em torno

do veio principal. Com o objetivo de compreender melhor o funcionamento deste mecanismo, foi realizado em *SolidWorks* um esquema simplificado dos componentes acoplados entre si, figura 4.1. Os rolamentos principais frontal e traseiro encontram-se entre estas peças, permitindo a rotação do *hub* do rotor, figura 4.2. O veio principal está acoplado ao estator do gerador que faz a ligação à torre do aerogerador por intermédio de outros componentes. Então, os rolamentos estão sujeitos a esforços transmitidos pela força de sustentação e de arrasto causada pelo vento nas pás, pelo peso das pás, dos adaptadores de pá, do *hub* do rotor e do veio principal. Não existem dados referentes ao peso dos adaptadores da pá, pelo que a primeira simplificação passa por não os considerar.

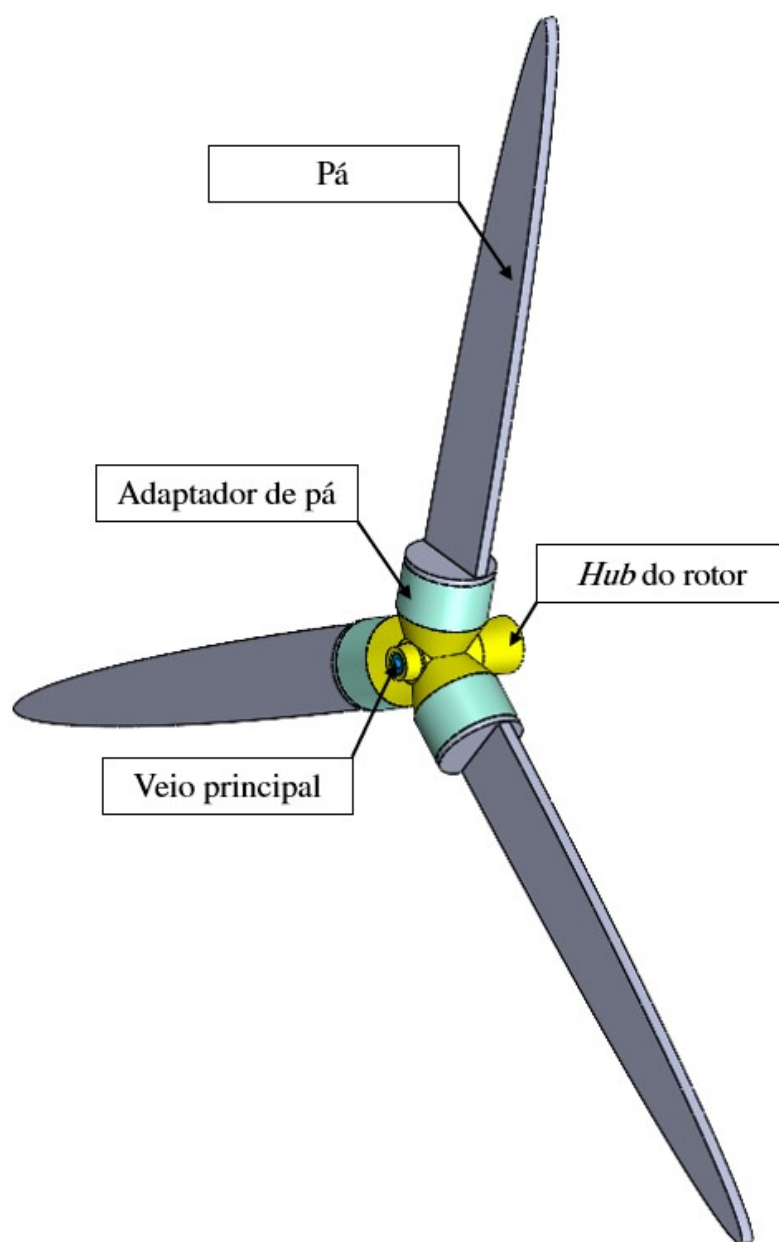


Figura 4.1: Representação dos diversos componentes em *SolidWorks*.

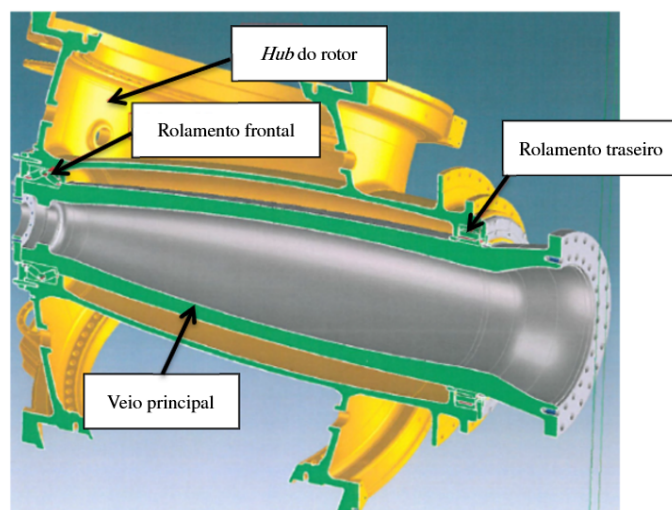


Figura 4.2: Vista em corte do rotor *hub* e veio principal. Adaptado de uma imagem fornecida pela *ENERCON*.

Na figura 4.3 pode-se observar quais as cargas aerodinâmicas atuantes numa determinada seção de uma pá do aerogerador. O plano do rotor encontra-se sempre perpendicular à direção do vento, no entanto a rotação do rotor cria uma velocidade do vento induzida alterando a direção de atuação do vento na pá, que dista de um ângulo ϕ do plano do rotor. Este ângulo é denominado de ângulo de ataque e existe um valor para o qual este maximiza o aproveitamento do vento, denominado de ângulo de ataque de pá ótimo. A força de arrasto, D , atua na direção do vento relativo e a força de sustentação, L , atua numa direção perpendicular a esta. A resultante da força de arrasto e da força de sustentação, F_{vento} , pode ser dividida na sua componente segundo a direção x , F_1 , e segundo a sua direção y , F_2 [25].

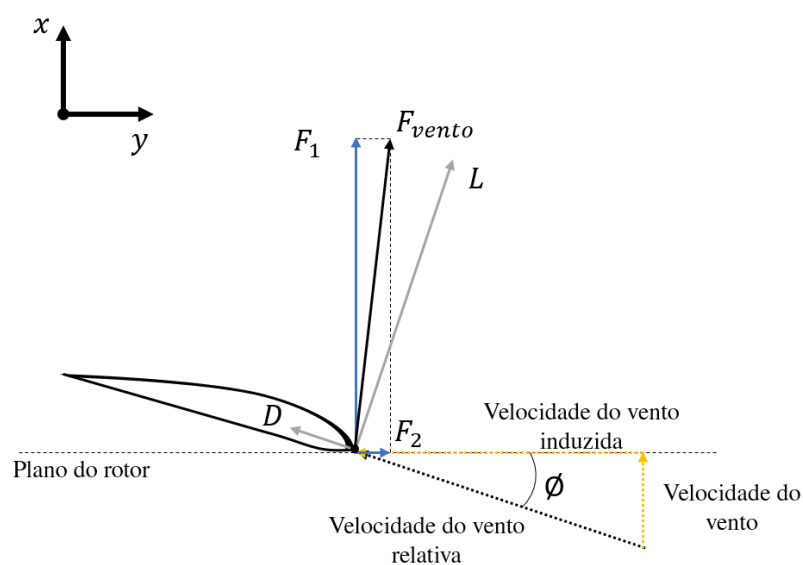


Figura 4.3: Cargas aerodinâmicas que atuam numa secção de pá.

A velocidade do vento relativa, V_{rel} , é dada por:

$$V_{rel}^2 = (1 - a)^2 \cdot V_0^2 + (1 + a')^2 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \quad (4.1)$$

Em que a representa um fator de indução axial, a' um fator de indução rotacional, V_0 a velocidade do vento normal ao plano do rotor, ω é a velocidade de rotação e r é a distância da ponta da secção da pá onde atuam as cargas aerodinâmicas ao eixo do rotor.

As cargas aerodinâmicas são dadas por:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot C_L \cdot V_{rel}^2 \quad (4.2)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot C_D \cdot V_{rel}^2 \quad (4.3)$$

Em que ρ representa a densidade do ar, c a distância de uma extremidade à outra da secção da pá e C_L e C_D o coeficiente de sustentação e arrasto, respetivamente.

Por último, as componentes F_1 e F_2 são dadas por:

$$F_1 = L \cdot \cos \phi + D \cdot \sin \phi \quad (4.4)$$

$$F_2 = L \cdot \sin \phi - D \cdot \cos \phi \quad (4.5)$$

Idealmente o cálculo destas forças é feito através da integração ao longo da pá por várias secções. No entanto, devido à ausência de informações detalhadas sobre o formato da pá, é impossível determinar estas cargas através deste método. Por este motivo, têm de ser realizadas múltiplas simplificações. É considerado um formato de pás retangulares, paralelas ao plano do rotor, visto que apenas existe informação das dimensões relativas à sua base, altura e espessura, calculando assim a força de arrasto e de sustentação de forma direta para as suas áreas superficiais. Não existem informações relativas aos coeficientes de indução e, uma vez que as cargas aerodinâmicas não vão ser calculadas através da divisão em múltiplas secções, é impossível determinar a componente r da velocidade do vento relativa. Deste modo, a velocidade do vento considerada no cálculo será a velocidade normal ao plano do rotor. Por último, não existem informações relativas aos coeficientes de arrasto e de sustentação, pelo que foram atribuídos valores arbitrários para estes. Assim, as equações 4.2 e 4.3 são adaptadas para:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot V_0^2 \quad (4.6)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_D \cdot C_D \cdot V_0^2 \quad (4.7)$$

Em que A_L corresponde à área superficial da pá paralela ao plano do rotor e A_D à área superficial correspondente à zona lateral da pá.

A velocidade nominal do vento para estes aerogeradores é de 14 m/s, o que significa que se a velocidade do vento for igual ou superior a este valor, o aerogerador aplica o controlo de *pitch* para manter a velocidade do rotor à sua velocidade nominal (18 rpm). Caso o vento ultrapasse os 25 m/s por mais de 10 minutos, a turbina é desligada por motivos de segurança [9]. Para saber se os aerogeradores em estudo estavam sujeitos a estas condições obteve-se pelos dados do SCADA os registos da velocidade de vento entre janeiro de 2015 e dezembro de 2020 para os parques eólicos críticos referidos na secção 3.3. Após análise, verificou-se que os parques de Almargem, Videira e Capucha possuem todas velocidades de vento médias por volta dos 7 m/s, mas superavam bastantes vezes os 14 m/s, chegando até a atingir máximas entre os 40 e 50 m/s. Assim, para a determinação das forças atuantes na turbina, assumiu-se uma velocidade do vento de 14 m/s. Na tabela 4.1 constam os dados necessários para a determinação das cargas:

Tabela 4.1: Dados necessários para a determinação das forças F_1 e F_2 .

Componentes	E-70 E4	E-82 E1
Massa da pá / kg	6000	8200
Massa do <i>hub</i> do rotor + veio principal / kg	42000	56000
Massa do rotor do gerador / kg	22500	24750
Velocidade do vento / m/s	14	14
Aceleração gravítica / m ² /s	9,81	9,81
Ângulo de ataque de pá ótimo / °	2,5	2,5
Comprimento da pá / m	34,03	39,8
Largura da pá / m	3,04	2,45
Espessura da pá / m	2,71	2,64
Área superficial para força de sustentação / m ²	103,45	97,51
Área superficial para força de arrasto / m ²	92,22	105,07
Densidade do ar / kg/m ³	1,29	1,29
Coefficiente de sustentação	0,948	0,948
Coefficiente de arrasto	0,00664	0,00664

Uma vez que a análise é realizada considerando a pá completa e não secções da pá, assume-se que as cargas aerodinâmicas atuam no centro de massa da pá. As componentes do balanço das forças de sustentação e de arrasto, F_1 e F_2 , possuem a direção do eixo do rotor e a direção perpendicular ao eixo longitudinal da pá (no plano da pá), respetivamente. Nas figuras 4.4 e 4.5 observam-se os diagramas de corpo livre estático (assume-se o caso de não existência de vento) e dinâmico, respetivamente, que contêm as cargas atuantes nos componentes do aerogerador que vão transmitir esforços para os rolamentos. A componente P_p representa o peso da pá e a componente P_c o peso do conjunto do *hub* do rotor e veio principal.

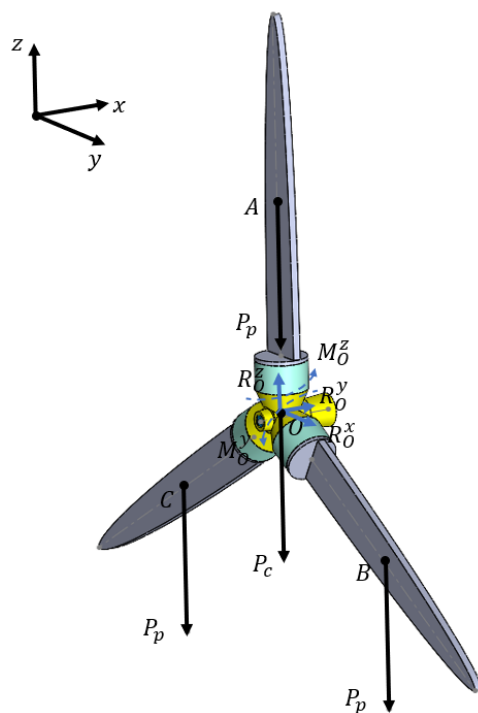


Figura 4.4: Diagrama de corpo livre estático do conjunto pás e *hub* do rotor.

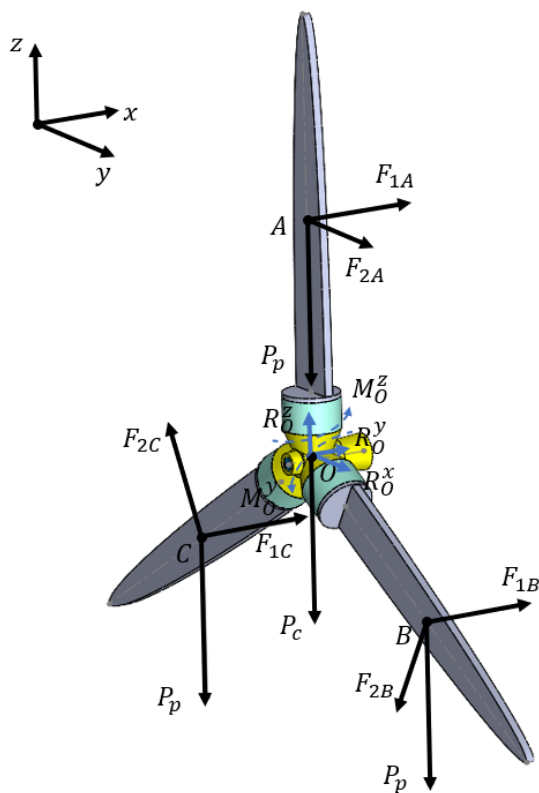


Figura 4.5: Diagrama de corpo livre dinâmico do conjunto pás e *hub* do rotor.

Para calcular as reações nos rolamentos, é necessário determinar forças atuantes no veio principal. É realizada mais uma simplificação, uma vez que se considera que as cargas transmitidas ao veio principal traduzem-se em cargas pontuais no ponto O . Para determinar estas cargas, é necessário fazer o balanço de forças e de momentos para esse ponto, sabendo que o rotor *hub* não absorve momentos segundo x .

Antes de fazer o balanço de esforços para o caso dinâmico é necessário estabelecer uma relação das forças dinâmicas F_2 com as suas componentes segundo o eixo y e z . Na figura 4.6 é possível observar a direção das cargas segundo uma vista normal ao plano yOz .

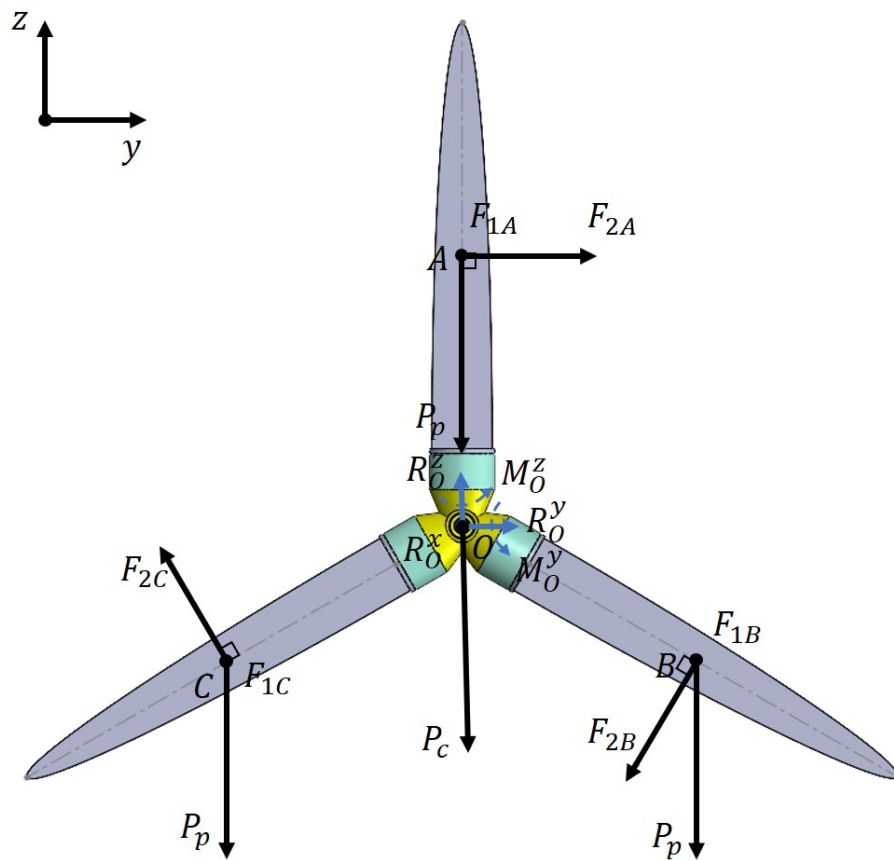


Figura 4.6: Diagrama de corpo livre do conjunto pás e *hub* do rotor, visto segundo uma direção normal ao plano zOy .

Para definir as componentes segundo y e z de cada força F_2 é necessário definir os ângulos que estas fazem com a vertical: α_A , α_B e α_C . Na figura 4.7 representa-se apenas as forças F_2 e os ângulos necessários para se estabelecer a relação de ângulos com o ângulo de rotação do rotor, θ .

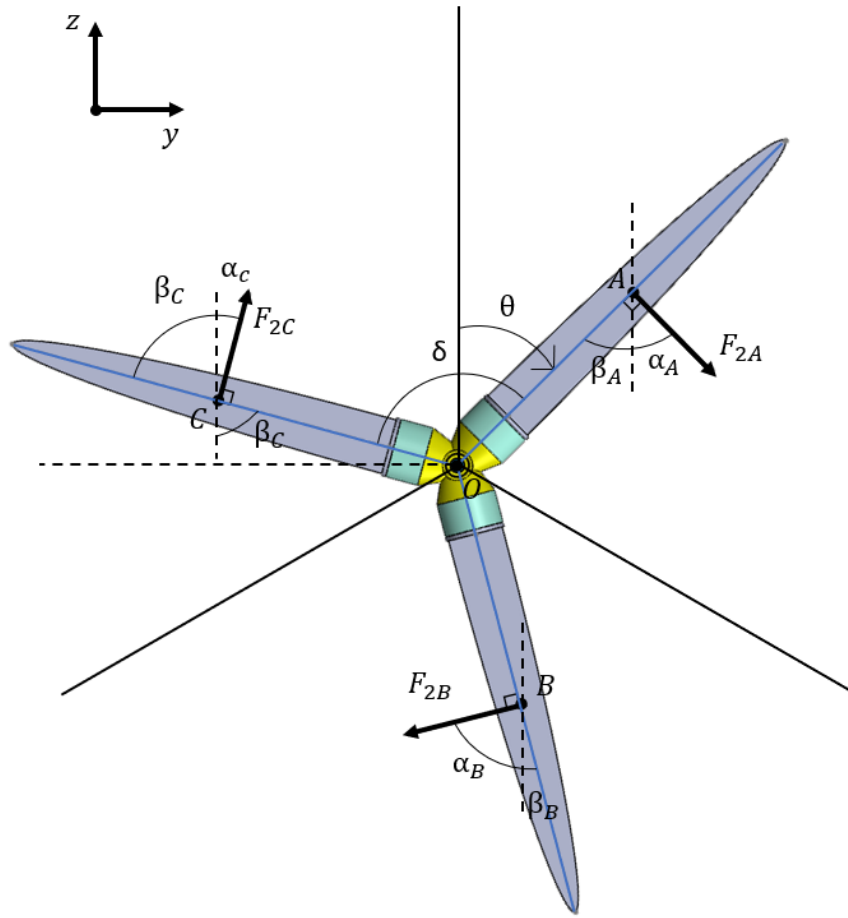


Figura 4.7: Diagrama de relação de ângulos.

Por observação da imagem é possível definir os ângulos α :

$$\begin{aligned}\beta_A &= \theta \\ \alpha_A &= \frac{\pi}{2} - \beta_A \\ \therefore \alpha_A &= \frac{\pi}{2} - \theta\end{aligned}\tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{2\pi}{3} \text{ rad} \\ \beta_B &= \pi - \delta - \theta \\ \therefore \beta_B &= \frac{\pi}{3} - \theta \\ \alpha_B &= \frac{\pi}{2} - \beta_B \\ \therefore \alpha_B &= \theta + \frac{\pi}{6}\end{aligned}\tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
\delta &= \frac{2\pi}{3} \text{ rad} \\
\beta_C &= \pi - \left[\frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - (\delta - \theta) \right) \right] \\
\therefore \beta_C &= \frac{2\pi}{3} - \theta \\
\alpha_C &= \frac{\pi}{2} - \beta_C \\
\therefore \alpha_C &= \theta - \frac{\pi}{6}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Sabe-se que o valor de as componentes das forças F_1 e F_2 são iguais entre os pontos A , B e C , então:

$$\begin{aligned}
F_{1A} &= F_{1B} = F_{1C} = F_1 \\
F_{2A} &= F_{2B} = F_{2C} = F_2
\end{aligned} \tag{4.11}$$

Observando a figura 4.4 é possível estabelecer o balanço de forças para o caso estático e obter as reações no ponto O :

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3 \cdot P_p + P_c \end{Bmatrix} \tag{4.12}$$

Observando a figura 4.5 é possível estabelecer o balanço de forças para o caso dinâmico e obter as reações no ponto O :

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} 3 \cdot F_1 \\ F_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) - F_2 \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) + F_2 \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \\ -3 \cdot P_p - P_c - F_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) - F_2 \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) + F_2 \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \end{Bmatrix} \tag{4.13}$$

Simplificando obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -3 \cdot F_1 \\ 0 \\ 3 \cdot P_p + P_c + 2 \cdot F_2 \cdot \sin \theta \end{Bmatrix} \tag{4.14}$$

Os momentos em O são dados por:

$$\begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} = \vec{OA} \times \vec{F}_A + \vec{OB} \times \vec{F}_B + \vec{OC} \times \vec{F}_C \tag{4.15}$$

Sabendo que a distância $OA=OB=OC=l$, obtém-se para o caso estático:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ l \cdot \sin \beta_A \\ l \cdot \cos \beta_A \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ l \cdot \sin \beta_B \\ -l \cdot \cos \beta_B \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_p \end{Bmatrix} + \\ &+ \begin{Bmatrix} 0 \\ -l \cdot \sin \beta_C \\ l \cdot \cos \beta_C \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P_p \end{Bmatrix} \\ \therefore \begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Para o caso dinâmico, os momentos em O são dados por:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ l \cdot \sin \beta_A \\ l \cdot \cos \beta_A \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \\ -P_p - F_2 \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ l \cdot \sin \beta_B \\ -l \cdot \cos \beta_B \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} F_1 \\ -F_2 \cdot \sin \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) \\ -P_p - F_2 \cdot \cos \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) \end{Bmatrix} + \\ &+ \begin{Bmatrix} 0 \\ -l \cdot \sin \beta_C \\ l \cdot \cos \beta_C \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \cdot \sin \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \\ -P_p + F_2 \cdot \cos \left(\theta - \frac{\pi}{6} \right) \end{Bmatrix} \\ \therefore \begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -3 \cdot F_2 \cdot l \cdot [\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)] \\ F_1 \cdot l \cdot [\cos(\theta) - \cos(\frac{\pi}{3} - \theta) + \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta)] \\ F_1 \cdot l \cdot [-\sin(\theta) - \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) + \sin(\frac{2\pi}{3} - \theta)] \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Simplificando obtém-se:

$$\begin{Bmatrix} M_O^x \\ M_O^y \\ M_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -3 \cdot F_2 \cdot l \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

Conclui-se que o ponto O não absorve momentos, uma vez que o rotor *hub* gira livremente segundo x e os momentos criados pelas restantes forças anulam-se segundo os outros 2 eixos. Substituindo os dados da tabela 4.1 nas equações 4.6 e 4.7 e aplicando o resultado nas equações 4.4 e 4.5, obtém-se o valores máximos de F_1 e F_2 , que assumem este valor para condições de funcionamento à velocidade nominal do rotor. Na tabela 4.2 apresenta-se os valores de todas as cargas:

Tabela 4.2: Valor das cargas para cada modelo.

Cargas	E-70 E4	E-82 E1
F_1 / N	12410,94	11698,84
F_2 / N	464,25	422,35
P_p / N	58860,00	80442,00
P_c / N	412020,00	549360,00
P_r / N	220725,00	242797,50

Aplicando os valores das cargas na equação 4.12 obtém-se as reações para o caso estático do modelo E-70 E4:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 588600,00 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.19)$$

E para o modelo E-82 E1:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 790686,00 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.20)$$

Aplicando os valores das cargas na equação 4.14 obtém-se as reações para o caso dinâmico do modelo E-70 E4:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -37232,81 \\ 0 \\ 588600,00 + 928,51 \cdot \sin \theta \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.21)$$

E para o modelo E-82 E1:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -35096,520 \\ 0 \\ 790686,00 + 844,69 \cdot \sin \theta \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.22)$$

Como se trata de dimensionamento de rolamentos, estes têm de estar dimensionados para o caso mais crítico. Deste modo, assume-se o valor máximo de R_O^z , que ocorre para $\theta = \frac{\pi}{2}$. Assim as reações do caso dinâmico do modelo E-70 E4 têm o valor de:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -37232,81 \\ 0 \\ 589528,51 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.23)$$

As reações do modelo E-82 E1 têm o valor de:

$$\begin{Bmatrix} R_O^x \\ R_O^y \\ R_O^z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -35096,52 \\ 0 \\ 791530,69 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.24)$$

Uma vez que o ponto O não possui reações segundo o eixo y nem momentos, é possível tratar o problema como 2D segundo o plano xOz . Existem 2 pormenores importantes que se podem observar na figura 2.5. O primeiro é que para além do rotor *hub*, o veio principal também suporta o rotor do gerador, sendo que o peso deste está aplicado diretamente no rolamento traseiro. O segundo pormenor é que o veio se encontra inclinado segundo um ângulo ξ em relação ao eixo x , em que $\xi = 5^\circ$. Por este motivo, é necessário fazer uma transformação das cargas representadas no referencial xOz para o referencial do veio principal $x'Oz'$. Estas são as cargas que atuam no ponto O , denominadas de F_O e que equivalem ao simétrico de R_O e o peso do rotor do gerador, denominado de P_r .

$$\begin{Bmatrix} F_O^{x'} \\ F_O^{y'} \\ F_O^{z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_O^x \cdot \cos \xi - F_O^z \cdot \sin \xi \\ 0 \\ F_O^x \cdot \sin \xi + F_O^z \cdot \cos \xi \end{Bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\begin{Bmatrix} P_r^{x'} \\ P_r^{y'} \\ P_r^{z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -P_r^z \cdot \sin \xi \\ 0 \\ P_r^z \cdot \cos \xi \end{Bmatrix} \quad (4.26)$$

Na figura 4.8 é possível verificar o diagrama de corpo livre do veio numa representação simplificada deste em *SolidWorks*.

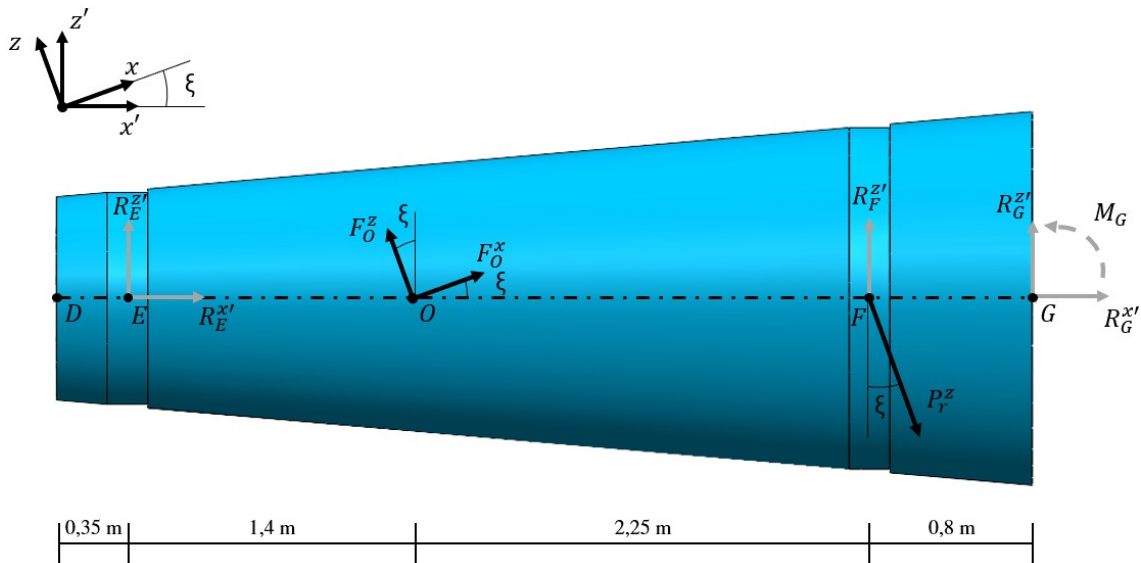


Figura 4.8: Diagrama de corpo livre do veio principal.

O rolamento frontal é de rolos cônicos de dupla pista, o que significa que absorve esforços axiais e radiais. O rolamento traseiro é de rolos cilíndricos o que implica que absorve apenas esforços radiais. Na face lateral onde se encontra o ponto G , o veio é encastrado, uma vez que está acoplado ao estator do gerador. Assim considera-se que o veio está sujeito a um apoio duplo (rolamento frontal), a um apoio simples (rolamento traseiro) e a um encastramento na face lateral direita. O veio é carregado no ponto F pelo peso do rotor do gerador e no ponto O pelas cargas determinadas nas equações 4.19 e 4.20 para o caso estático e pelas cargas determinadas nas equações 4.23 e 4.24 para o caso dinâmico. Na análise estática, a carga F'_O no modelo E-70 E4 é dada por:

$$\begin{Bmatrix} F'_O \\ F'_O \\ F'_O \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 51299,87 \\ 0 \\ -586360,20 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.27)$$

E para o modelo E-82 E1, tem o valor de:

$$\begin{Bmatrix} F'_O \\ F'_O \\ F'_O \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 68912,83 \\ 0 \\ -787677,20 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.28)$$

Na análise dinâmica, a carga F'_O no modelo E-70 E4 é dada por:

$$\begin{Bmatrix} F'_O \\ F'_O \\ F'_O \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 88471,92 \\ 0 \\ -584040,12 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.29)$$

E para o modelo E-82 E1, tem o valor de:

$$\begin{Bmatrix} F'_O \\ F'_O \\ F'_O \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 103949,42 \\ 0 \\ -785459,82 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.30)$$

Por último, a carga P'_r no modelo E-70 E4 é dada por:

$$\begin{Bmatrix} P'_r \\ P'_r \\ P'_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 19237,45 \\ 0 \\ -219885,07 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.31)$$

E no modelo E-82 E1 equivale a:

$$\begin{Bmatrix} P'_r \\ P'_r \\ P'_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 21161,20 \\ 0 \\ -241873,58 \end{Bmatrix} \text{ N} \quad (4.32)$$

Para determinar as reações a que os rolamentos de cada modelo estão sujeitos no caso estático e dinâmico, recorreu-se ao programa *BEAMGURU*, que funciona à base do método dos elementos finitos. Nas figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 observa-se uma representação dos casos em análise, bem como os diagramas de esforços e momentos.

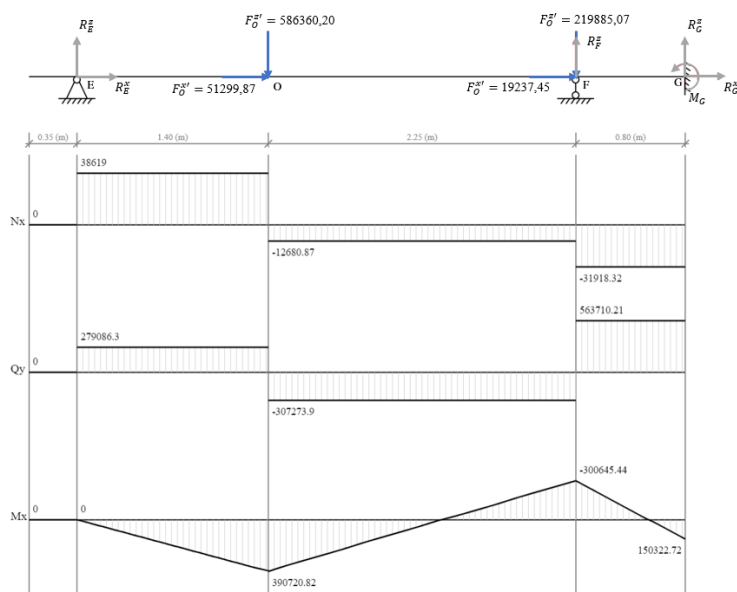


Figura 4.9: Esquema do veio do modelo E-70 E4 e diagramas de esforços e momentos para a análise estática. Imagem criada no programa *BEAMGURU*.

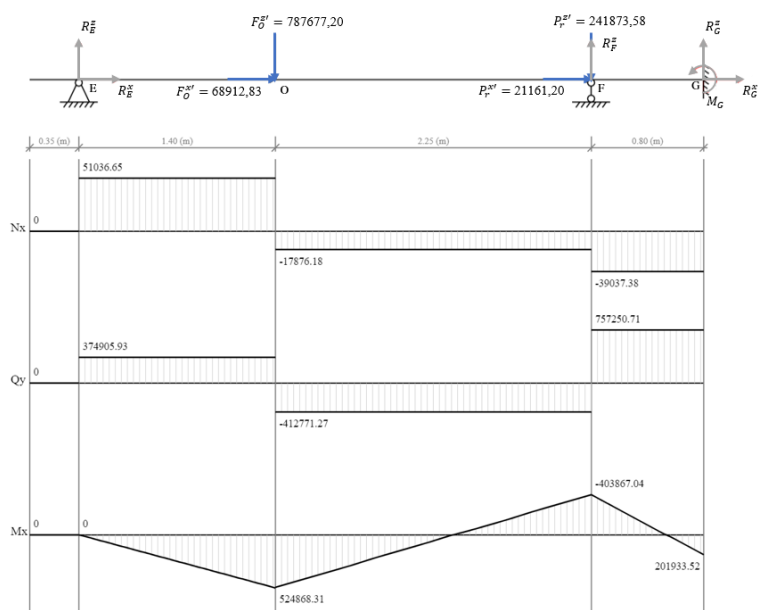


Figura 4.10: Esquema do veio do modelo E-82 E1 e diagramas de esforços e momentos para a análise estática. Imagem criada no programa *BEAMGURU*.

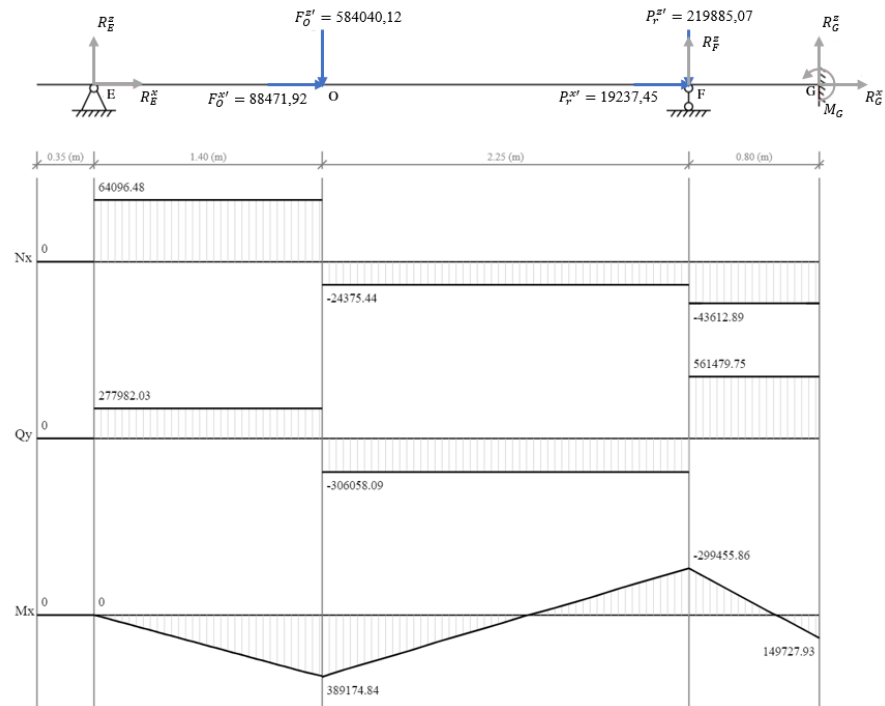


Figura 4.11: Esquema do veio do modelo E-70 E4 e diagramas de esforços e momentos para a análise dinâmica. Imagem criada no programa *BEAMGURU*.

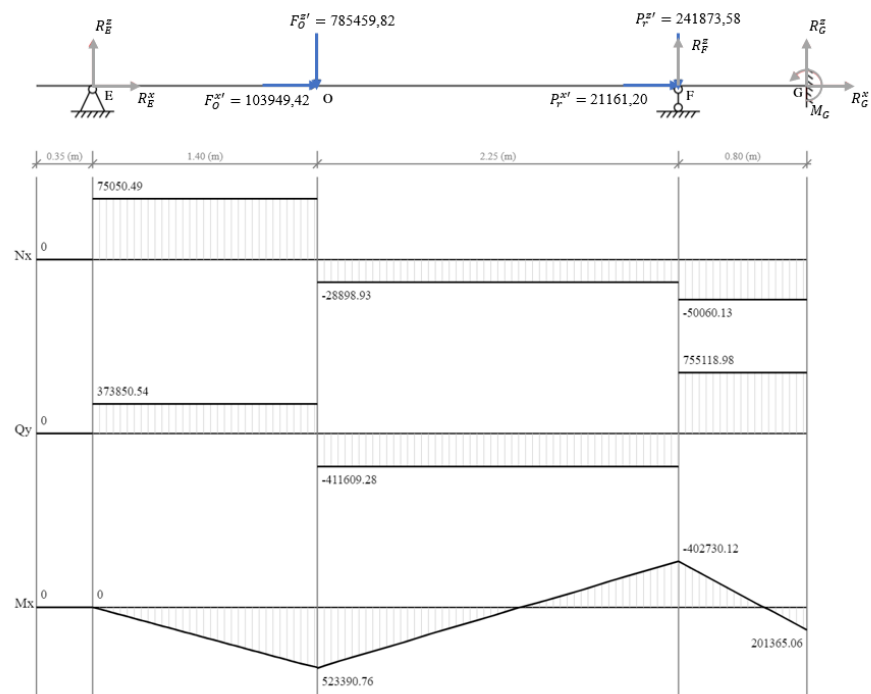


Figura 4.12: Esquema do veio do modelo E-82 E1 e diagramas de esforços e momentos para a análise dinâmica. Imagem criada no programa *BEAMGURU*.

Na análise estática do modelo E-70 E4, os rolamentos estão sujeitos aos seguintes esforços:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} R_E^x \\ R_E^y \\ R_E^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -38619,00 \\ 0 \\ 279086,30 \end{Bmatrix} \text{ N} \\ \begin{Bmatrix} R_F^x \\ R_F^y \\ R_F^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1090869,17 \end{Bmatrix} \text{ N} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Na análise estática do modelo E-82 E1, os rolamentos estão sujeitos aos seguintes esforços:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} R_E^x \\ R_E^y \\ R_E^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -51036,65 \\ 0 \\ 374905,93 \end{Bmatrix} \text{ N} \\ \begin{Bmatrix} R_F^x \\ R_F^y \\ R_F^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1411895,56 \end{Bmatrix} \text{ N} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Na análise dinâmica do modelo E-70 E4, os rolamentos estão sujeitos aos seguintes esforços:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} R_E^x \\ R_E^y \\ R_E^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -64096,48 \\ 0 \\ 277982,03 \end{Bmatrix} \text{ N} \\ \begin{Bmatrix} R_F^x \\ R_F^y \\ R_F^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1087422,91 \end{Bmatrix} \text{ N} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Na análise dinâmica do modelo E-82 E1, os rolamentos estão sujeitos aos seguintes esforços:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} R_E^x \\ R_E^y \\ R_E^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} -75050,49 \\ 0 \\ 373850,54 \end{Bmatrix} \text{ N} \\ \begin{Bmatrix} R_F^x \\ R_F^y \\ R_F^z \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1408601,84 \end{Bmatrix} \text{ N} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Com as cargas a que os rolamentos estão sujeitos para o caso estático e dinâmico determinadas, é possível proceder ao dimensionamento dos rolamentos. A ideia inicial passava por determinar a capacidade de carga estática e dinâmica para as cargas calculadas e compará-las com os valores dos rolamentos presentes nas turbinas para os 2 modelos. No entanto, embora seja conhecida a designação dos rolamentos (Frontal: SKF BT2-8079/HA1 ou FAG F089483 TR2 H113 BRB 872 A. Traseiro: FAG F-804522.ZL-H113), o fabricante não disponibilizou as suas informações

técnicas. Os rolamentos estão sujeitos a contratos de confidencialidade entre o fabricante *ENERCON* e os produtores dos rolamentos, *SKF* e *FAG*, pelo que estes não se encontram disponíveis em catálogos, impossibilitando assim, a obtenção dos seus dados técnicos. Visto que não é possível obter informações relativas aos rolamentos, não é possível fazer a comparação pretendida. Mesmo assim, determinam-se os valores das capacidades de carga dinâmica e estática para o caso de no futuro, a *Finerge* conseguir ter acesso às informações dos rolamentos e poder realizar a comparação pretendida.

A capacidade de carga estática do rolamento é dada por:

$$C_0 = f_S \cdot P_0 \quad (4.37)$$

Em que f_S é um fator de esforço estático que varia entre 0,7 e 1 para exigências reduzidas, 1 e 1,5 para exigências moderadas e 1,5 e 2,5 para exigências elevadas. Para este caso assume-se um valor de 1,5. Este representa um fator de segurança que perserva a ocorrência de deformações plásticas excessivas nos pontos de contacto entre os elementos rolantes e a pista [26]. A componente P_0 é a carga estática equivalente que é obtida por uma relação das cargas axiais e radiais atuantes no rolamento no caso estático. Para o rolamento frontal (rolamento de rolos cónicos de dupla pista) a carga estática equivalente é dada por [16]:

$$P_0 = F_{0r} + Y_0 \cdot F_{0a} \quad (4.38)$$

Em que F_{0r} é a força estática radial, Y_0 é um fator axial que depende do rolamento e F_{0a} é a força estática axial.

Para o rolamento traseiro (rolamento de rolos cilíndricos) a carga estática equivalente é a única carga presente, visto que este rolamento apenas está sujeito a cargas radiais:

$$P_0 = F_{0r} \quad (4.39)$$

A capacidade de carga dinâmica é dada por [14]:

$$C = \sqrt[s]{\frac{L \cdot P^s}{10^6}} \quad (4.40)$$

Em que s é um fator de vida que depende do tipo de elementos rolantes, assumindo o valor de 3 para esferas e $\frac{10}{3}$ para rolos. A componente L é a vida nominal em revoluções e P é a carga dinâmica equivalente. A vida nominal é dada por:

$$L = \frac{L_h \cdot n \cdot 60}{a \cdot 10^6} \quad (4.41)$$

Em que a componente L_h é o número de horas de funcionamento do rolamento que equivale a 175200 horas para 20 anos, n é a velocidade por minuto que assume o valor de 3,42 para o modelo E-70 E4 e 2,86 para o modelo E-82 E1 e a é um fator de probabilidade de falha que equivale 0,21 para uma probabilidade de falha de 1%.

Para o rolamento frontal (rolamento de rolos cónicos de dupla pista) a carga dinâmica equivalente é dada por [16]:

$$\begin{aligned} P &= F_r + Y_1 \cdot F_a, \text{ para } \frac{F_a}{F_r} \leq e \\ P &= 0,67 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a, \text{ para } \frac{F_a}{F_r} > e \end{aligned} \quad (4.42)$$

Em que F_r é a força dinâmica radial, F_a é a força dinâmica axial e Y_1 , Y_2 e e são fatores de cálculo que variam consoante o rolamento. Os valores utilizados nestes fatores e no Y_0 foram retirados de um rolamento da *SKF* com a designação semelhante ao rolamento frontal dos aerogeradores [27]:

$$\begin{aligned} Y_0 &= 2,2 \\ Y_1 &= 2,2 \\ Y_2 &= 3,3 \\ e &= 0,31 \end{aligned} \quad (4.43)$$

Para o rolamento traseiro (rolamento de rolos cilíndricos) a carga dinâmica equivalente é a única carga presente, visto que este rolamento apenas está sujeito a cargas radiais:

$$P = F_r \quad (4.44)$$

É possível agora determinar o valor da capacidade de carga estática e dinâmica. Assim obtém-se para o rolamento frontal do modelo E-70 E4:

$$\begin{aligned} C_0 &= 546072,15 \text{ N} \\ C &= 24266,69 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.45)$$

E para o rolamento traseiro do mesmo modelo (Este não é um dos rolamentos críticos mas foi calculado devido à automatização do processo):

$$\begin{aligned} C_0 &= 1636303,76 \text{ N} \\ C &= 80633,57 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Para o rolamento frontal do modelo E-82 E1 obtém-se:

$$\begin{aligned} C_0 &= 730779,84 \text{ N} \\ C &= 29216,87 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.47)$$

E para o seu rolamento traseiro:

$$\begin{aligned} C_0 &= 2117843,34 \text{ N} \\ C &= 99027,51 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Conhecidas as capacidades de carga, seria possível compará-las com as dos rolamentos presentes nos aerogeradores. Outra opção em caso do conhecimento dos dados técnicos dos rolamentos, seria realizar o procedimento inverso e determinar quais as cargas a que os rolamentos estão sujeitos, com o intuito de comparar com o valor das cargas obtidas.

4.3 Análise do lubrificante

O lubrificante utilizado nos rolamentos pela *ENERCON* é diferente do lubrificante recomendado pelo fabricante dos rolamentos (*FAG/SKF*). O lubrificante recomendado pela *FAG* é o *Arcanol LOAD 400*, contudo, a *ENERCON* utiliza para os modelos E-70 E4 e E-82 E1 a massa *Mobil SHC 460 WT* e para os modelos E-82 E2 e E-92 *Klüberplex BEM 41-141* como seu substituto. Na tabela 4.3 observa-se as propriedades dos 3 lubrificantes.

Tabela 4.3: Propriedades dos 3 tipos de lubrificante. Fonte [28, 29]

Propriedades	Arcanol	Klüberplex	Mobil
Complexos do espessante	Lítio e cálcio	Lítio	Lítio
Óleo de base	Óleo mineral	Sintético/óleo mineral	Sintético
Viscosidade do óleo de base 40°C / mm ² /s	400	130	460
Consistência segundo o padrão NLGI	2	1	1,5
Temperatura de operação / °C	-20 a 130	-40 a 150	-30 a 150
Ponto de gota \ °C	165	250	255

A *ENERCON* possui um registo do uso desta mistura de lubrificantes nas suas turbinas por todo o globo. Deste modo é muito improvável que o lubrificante utilizado seja inadequado, uma vez que mesmo em países de extremas temperaturas, como a Índia, são utilizados estes lubrificantes sem problemas.

4.4 Análise do RCA

Nos 25 registos de avarias de rolamentos discutidos na secção 3.3, foram realizados apenas 2 relatórios RCA, referentes à mesma situação. Trata-se de uma avaria do rolamento principal traseiro de um modelo E-82 E2. Uma das análises foi realizada pelo fabricante *ENERCON* e a outra foi realizada por uma empresa contratada pela *Finerge*, a 8.2. Uma vez que o *hub* do rotor foi enviado para as fábricas da *ENERCON*, visto tratar-se de uma falha no rolamento traseiro, realizou-se também uma análise ao rolamento frontal. Nesta secção analisa-se o procedimento e as conclusões provenientes de cada um dos relatórios.

4.4.1 Relatório da *ENERCON*

O rolamento traseiro continha componentes quebrados e vestígios de partículas metálicas no lubrificante. O rolamento frontal apresentava danos e também continha vestígios de partículas metálicas no lubrificante. Os rolamentos apresentavam indentações devido às partículas presentes nos lubrificantes.

Alguns dos fragmentos do rolamento traseiro foram enviadas para uma empresa externa para serem submetidas a análises da sua composição química, microestrutura e dureza. Estas análises apresentaram resultados dentro dos normais pelo que a origem da falha do rolamento não está relacionada com defeitos no fabrico e na qualidade do material. O nível de corrosão por fricção detetado encontrava-se dentro dos parâmetros normais.

Foram ainda realizadas medições referentes ao posicionamento do rolamento de forma a verificar a possibilidade de deslocamento deste ou da sua incorreta montagem. No entanto todas as medições efetuadas encontravam-se dentro dos critérios especificados.

Com o RCA, a *ENERCON* conclui que não foi possível determinar a origem da avaria dos rolamentos, referindo ainda que todos os sistemas técnicos possuem uma taxa estatística residual que pode levar à falha prematura de um componente do sistema, tal como o rolamento em questão. Indica ainda que um desvio dos valores teóricos do tempo de serviço do rolamento pode ser causado por:

- Circunstâncias específicas da localização da turbina, como condições atmosféricas;
- Tolerâncias técnicas;
- Qualidade do material;
- Alteração das propriedades do lubrificante devido a contaminação ou humidade.

Por último a *ENERCON* indica que em muitos casos de danos em rolamentos, uma conclusão relativamente à origem deste não é possível devido ao estado avançado do dano, sendo que é possível realizar uma inspeção mais detalhada, no entanto é necessário ter em atenção a relação custo-benefício [30].

4.4.2 Relatório da 8.2

O rolamento traseiro apresentou duas subidas de temperatura durante o seu funcionamento, uma 9 meses antes da paragem da turbina e outra antes da sua paragem, uma vez que atingiu valores críticos. Antes da primeira subida de temperatura, o rolamento funcionava entre 30°C e 40°C. Com a subida de temperatura passou a funcionar por volta dos 50°C até à sua paragem, uma vez que excedia os 120°C.

Averiguando o registo de manutenções da turbina, a 8.2 verificou que esta apenas foi sujeita a uma manutenção no ano anterior, sendo que a *ENERCON* especifica que devem ser feitas 2 manutenções por ano. A última manutenção foi realizada duas semanas antes da paragem da turbina. É de notar que a *ENERCON* apenas analisa a temperatura quando esta ultrapassa valores

de alarme. A penúltima inspeção foi realizada 11 meses antes, enquanto a temperatura estava dentro dos valores iniciais de funcionamento. No dia de paragem da turbina devido ao excesso de temperatura, os técnicos reportaram ainda a presença de um som audível fora do comum.

Os técnicos da 8.2 foram autorizados a presenciar as operações de desmontagem dos rolamentos nas fábricas da *ENERCON*, de forma a poderem realizar o seu próprio RCA. Após a análise dos rolamentos, verificou-se que o rolamento traseiro foi sujeito a esforços que levaram à quebra de cerca de um terço do seu anel exterior. Além disso, a gaiola apresentava danos devido à rotação permanente contra os fragmentos do anel exterior. Relativamente ao rolamento frontal, este apresentava indentações nos elementos rolantes e no anel exterior. Após analisarem o relatório relativo aos fragmentos realizada pela empresa externa contratada pela *ENERCON*, a 8.2 conclui que a composição do material do rolamento estava de acordo com o previsto. No entanto, notam que não foi realizada uma análise à microestrutura deste, o que poderia gerar mais informações referentes ao tipo de dano que o rolamento sofreu, como por exemplo danos devido a desgaste, calor ou impactos mecânicos. Referem ainda que esta análise poderia levar à origem da causa do dano.

A 8.2 indica também que o dano no rolamento tem pouca probabilidade de ser devido ao lubrificante utilizado pela *ENERCON*, uma vez que este já se encontra testado e é utilizado em toda a frota das turbinas *ENERCON*. O rolamento frontal apresenta danos de fadiga mas poderia continuar em operação durante centenas de horas sem impacto significativo uma vez que se trata de uma operação com velocidades de rotação reduzidas. A 8.2 salienta ainda que os danos encontrados neste rolamento podem ter sido causados ou acelerados pelos danos no rolamento traseiro. Relativamente ao rolamento traseiro, a 8.2 refere que o dano principal foi a quebra do anel exterior e que este provocou danos subsequentes tal como o desgaste e aparecimento de indentações nos elementos rolantes. Esta fratura não foi analisada em laboratório, mas suspeita-se que pode ser o resultado de esforços axiais permanentes no rolamento, criando uma fissura inicial devido a imperfeições no anel exterior [28].

4.5 Conclusões

É importante voltar a referir que o método seguido para analisar os rolamentos embora aborde um procedimento bastante completo, está sujeito a muitas simplificações que se devem à falta de dados ou de acesso a software necessário para obter uma melhor descrição do problema. Por este motivo, os resultados obtidos são aproximados e estão sujeitos a um erro devido às simplificações realizadas. No entanto, todas as simplificações foram referidas, pelo que caso a *Finerge* obtenha dados no futuro que não se encontravam disponíveis, irá conseguir aprimorar a análise realizada.

No modelo realizado considerou-se que o rolamento traseiro apenas absorvia esforços radiais, no entanto, no caso real, este também vai estar sujeito a esforços axiais, tal como se pode observar nos diagramas de esforços axiais das figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12. Esta situação está de acordo com o que foi referido no relatório RCA da 8.2: a suspeita da presença de esforços axiais no rolamento traseiro, que podem ter provocado a fratura do anel exterior do rolamento analisado.

Deste modo, a utilização de um rolamento de rolos cilíndricos no rolamento traseiro pode não ser a mais indicada uma vez que este tipo de rolamento tem uma capacidade de suportar esforços axiais bastante reduzida.

Na equação 4.41 utilizou-se o fator a para garantir um dimensionamento de um rolamento que possui apenas 1% de probabilidade de falha. No entanto, podem ainda ser multiplicados 2 fatores a este, que estão relacionados com o material do rolamento e com as condições de operação. Deste modo sobredimensiona-se o rolamento para garantir uma maior margem de segurança.

Em termos da lubrificação do rolamento, embora o lubrificante seja adequado, tal como indicado no relatório RCA da 8.2, existe ainda a possibilidade de existirem problemas no sistema de lubrificação. Tal pode ser devido a este não estar projetado de forma eficiente e adequada. No entanto para perceber se este é o caso, será necessário realizar um estudo dedicado ao mesmo. Este é um ponto a considerar uma vez que a *Finerge* reportou casos em que as tubagens de alimentação se encontravam entupidas com a massa lubrificante e que havia rolamentos em que a massa lubrificante antiga secava, criando uma barreira que bloqueava a passagem do lubrificante para o rolamento. Tal pode ser devido ao mau dimensionamento das zonas de extração da massa usada e do sistema de alimentação em si.

Embora os relatórios RCA tenham fornecido informações relevantes, principalmente o realizado pela 8.2, estes são apenas referentes a um caso. Deste modo, a realização deste tipo de análise em todas as avarias futuras irá permitir obter mais informações que quando analisadas em conjunto são complementares para as análises realizadas, possibilitando a determinação de problemas recorrentes e em consequência, deteção da origem das falhas. Deste modo recomenda-se que a realização de um RCA seja uma metodologia obrigatória em caso de avaria de um rolamento.

Capítulo 5

Propostas de melhoria da manutenção

5.1 Introdução

Neste capítulo são referidas propostas para otimizar a manutenção dos rolamentos dos aerogeradores do caso de estudo que ambicionam reduzir as suas taxas de avaria e estender a sua vida útil. Na primeira secção são indicados métodos de manutenção a aplicar ao longo da vida do aerogerador enquanto que na segunda secção são apresentadas recomendações para controlar as falhas mais recorrentes em rolamentos.

5.2 Manutenção/Monitorização ao longo da vida de um rolamento

Nesta secção apresentam-se possíveis métodos de monitorização a aplicar em 3 instâncias distintas ao longo da vida de um rolamento: após a sua instalação, durante o seu funcionamento e no caso de falha do rolamento. O objetivo é aplicar técnicas de manutenção preditiva nos 2 primeiros momentos e manutenção corretiva no último. Deste modo, é possível maximizar a vida útil do rolamento, reduzir o tempo de paragem da turbina eólica devido à falha deste e compreender quais as causas que provocam falhas nos rolamentos, corrigindo-as.

5.2.1 Instalação

Como referido anteriormente, a falha de um rolamento pode ser devida a problemas no seu fabrico, transporte ou até devido ao seu incorreto manuseamento durante a sua instalação. Uma forma de combater estas possíveis causas de dano é a criação de equipas de supervisão e de análise de rolamentos. Embora a *ENERCON* garanta que a instalação e substituição dos rolamentos ou componentes onde estes se encontram, seja feita segundo normas rigorosas estipuladas [30], a *Finerge* demonstra receio no modo como o fabricante manuseia os rolamentos durante a sua instalação. Após várias experiências de técnicos da *Finerge* no acompanhamento de substituição de componentes, há a possibilidade de as intervenções não cumprirem integralmente com as prescrições. Deste modo, a criação de equipas de supervisão devidamente formadas pode vir a evitar danos de incorreto manuseamento e instalação.

Mesmo que o manuseamento seja o devido, resta ainda a hipótese do rolamento se encontrar danificado devido a problemas no seu fabrico ou transporte. Um método de eliminar estes riscos é através da realização de análises ao modo de vibração do rolamento após a sua instalação. Na subsecção seguinte é referida com mais detalhe o modo de como esta análise funciona. Ao realizar uma análise vibratória a cada rolamento aquando da instalação de um novo aerogerador, ou até mesmo na substituição de um rolamento a uma turbina já existente, é possível fazer um registo dos dados obtidos para cada tipo de rolamento em cada modelo. Para rolamentos idênticos, em máquinas idênticas, é esperado que ambos os rolamentos possuam um modo de vibração igual. Deste modo, ao fazer o registo logo após a instalação do rolamento, é possível obter uma curva característica de referência para cada tipo de rolamento. Assim, no caso do aparecimento de um rolamento previamente danificado, devido à precisão da análise do seu modo de vibração, a curva deste vai-se desviar da curva padrão para um rolamento em bom estado, sendo possível determinar se um rolamento se encontra previamente danificado. Esta análise pode ser realizada por empresas externas contratadas ou pela mesma equipa de supervisão de instalação desde que sejam adquiridos os equipamentos necessários e realizadas as devidas formações.

5.2.2 Funcionamento da máquina

A monitorização dos rolamentos durante o funcionamento de um aerogerador é imperativa para garantir que este se encontra a operar nas melhores condições e ainda evitar a danificação de outros componentes. Como referido na secção 3.2, a manutenção realizada pela *ENERCON* apenas permite identificar quando um rolamento já se encontra com um dano num estágio de evolução significativo. Existem melhores opções no mercado atual para fazer a monitorização de rolamentos de aerogeradores, sendo de destaque a análise de vibrações. Este tipo de análise consegue prever quando irá ocorrer a falha de um rolamento com até um ano de antecedência, permitindo assim atuar atempadamente de forma a mitigar os danos do rolamento. Para o exemplo mais crítico do rolamento traseiro, tal como referido na subsecção 3.3.1, uma falha neste pode originar uma paragem do aerogerador de cerca de 5 meses devido ao tempo de espera causado pelo fabrico de um *hub* do rotor novo. Ao saber quando irá ocorrer a falha, é possível fazer a encomenda do rolamento/*hub* do rotor antes deste atingir o limite da sua vida útil e reduzir de forma significativa o tempo de paragem do aerogerador, uma vez que fica apenas dependente das operações de substituição. Para além da antecipação da falha que a análise de vibrações permite, esta também consegue identificar a causa da falha como por exemplo lubrificação insuficiente, deslizamento dos elementos rolantes, desalinhamento do rolamento, entre outros [31].

A análise de vibrações de rolamentos funciona através da medição de impactos de muito baixo nível em comparação com outras amplitudes elevadas presentes no rolamento [32]. Na figura 5.1 observa-se um exemplo simplificado da geração de impactos em rolamentos. O anel exterior do rolamento encontra-se danificado, deste modo ao fazer uma análise ao modo de vibração do rolamento esta vai apresentar um pequeno impulso sempre que um elemento rolante atravessar a zona danificada, tal como se observa no gráfico.

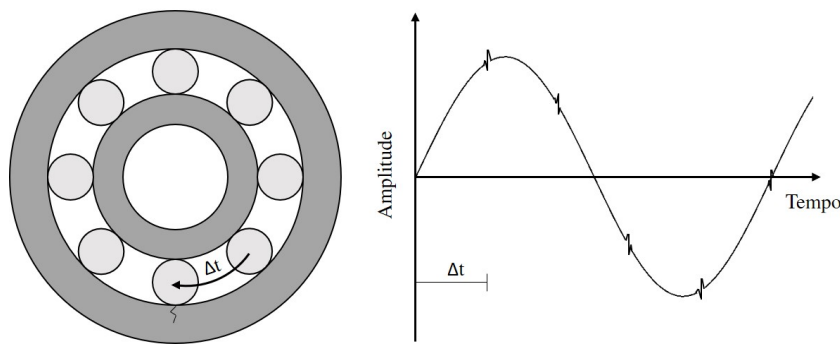
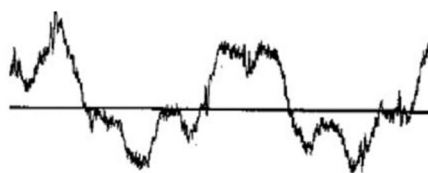


Figura 5.1: Exemplo do impacto de uma fissura no anel exterior no modo de vibração do rolamento.

As amplitudes criadas pelo impacto da fissura possuem um nível muito reduzido que vai aumentando com a evolução da falha [31]. No entanto na análise de vibrações de um rolamento, para além dos impactos de muito baixo nível presentes devido à fissura do rolamento, estão presentes outras vibrações de amplitude elevada existentes na máquina, pelo que é necessário proceder à filtragem dos resultados obtidos. Para isso é aplicada-se uma análise de envelope, que se trata de uma análise de precisão elevada para detetar os impactos referidos. A análise envelope para a deteção digital de picos de impacto consiste em primeiro lugar na aplicação de um filtro passa alto, um filtro que remove as frequências baixas. Como as vibrações dos rolamentos em degradação, nas suas fases iniciais, surgem sobretudo em aceleração, nas altas frequências, consegue-se fazer a separação das vibrações dos impactos, através da utilização de um filtro passa alto das vibrações medidas (Figura 5.2). Desta forma consegue-se efetuar a separação das vibrações dos impactos nos rolamentos das outras vibrações da máquina.



(a) Forma da onda antes do filtro



(b) Forma da onda após o filtro. Representa apenas os impactos no rolamento.

Figura 5.2: Separação das vibrações geradas pela introdução do filtro passa alto. Adaptado de [32] com autorização da DMC.

De seguida é necessário proceder-se à retificação da forma de onda para se conhecer o período de repetição dos choques. Assim consegue-se detetar digitalmente os picos de impactos e efetua-se um FFT (*Fast Fourier Transform*), que permite transformar o sinal para um espectro no domínio da frequência facilitando assim a análise dos impactos [32]. Na figura 5.3 é possível observar um exemplo do sinal inicial das vibrações e o espectro envelope obtido para um dano no anel exterior.

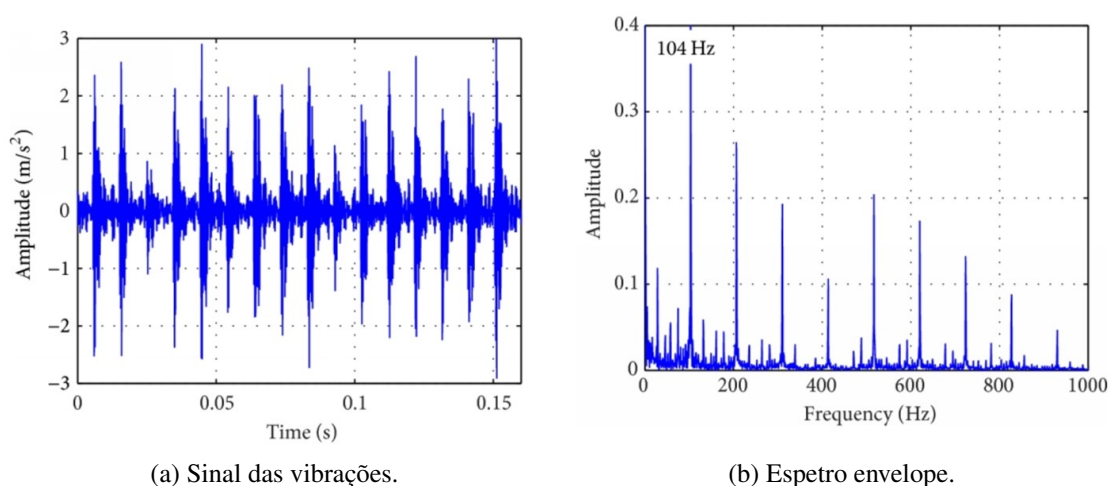


Figura 5.3: Exemplo de análise de vibrações para um dano no anel exterior de um rolamento. Adaptado de [33].

A *Finerge* já esteve envolvida em 2 projetos de análises de vibrações. O primeiro, um projeto piloto com a empresa *ONYX InSight* que teve início em 2019 e consiste na monitorização contínua do balanceamento do rotor e dos rolamentos de 6 aerogeradores (3 dos quais de acoplamento direto). Os dados são recolhidos através de sensores aplicados na zona dos rolamentos e a *ONYX InSight* é responsável pela monitorização e emissão de relatórios mensais sobre o estado dos rolamentos. O objetivo deste projeto para a *Finerge* era uma introdução à monitorização dos rolamentos por análises de vibrações com o intuito de perceber a sua eficácia e utilidade.

O segundo projeto foi a realização de análises de vibração aos rolamentos do veio principal de 3 aerogeradores pela empresa *DMC*, sendo que um dos aerogeradores era o modelo E-82 E2. A análise a esta turbina foi inserida na realização desta dissertação, uma vez que criou a possibilidade de realizar uma visita ao parque eólico e entrar em contacto com os técnicos da *DMC*, onde foi possível realizar uma troca de impressões sobre o tema em estudo.

Para a máquina do modelo E-82 E2 analisada, foram detadas em ambos os rolamentos frequências que podem estar associadas ao desenvolvimento de anomalias nos rolamentos, pelo que a *DMC* recomendou a análise da massa lubrificante e proceder a uma análise vibrométrica num prazo inferior a 3 meses. Relativamente aos outros 2 aerogeradores, não foram encontrados indícios de danos, sendo que foi recomendada uma nova análise num prazo inferior a 6 meses para um dos aerogeradores e um ano para o outro [34]. A *DMC* propôs ainda uma parceria com a *Finerge* que consiste no aprovisionamento de equipamentos e software, formação dos técnicos da *Finerge* em tecnologias de manutenção preditiva como análises de vibrações e termografia e o acompanhamento numa fase inicial por parte da *DMC* na interpretação de resultados e emissão de recomendações. Os sensores seriam de montagem permanente e o objetivo seria aplicá-los em todos os aerogeradores. Esta solução permite diminuir o tempo de inspeção, uma vez que não é necessário estar a colocar os sensores a cada inspeção e melhora a repetibilidade das medidas, visto que a posição do sensor pode influenciar os dados obtidos.

Na tabela 5.1 observa-se os custos relativos a ambos os projetos, nomeadamente, o CAPEX que retrata os custos de aquisição e o OPEX que é referente aos custos para manter a monitorização.

Tabela 5.1: Comparação dos custos de monitorização.

	ONYX InSight	DMC
CAPEX	2250,00 €/Turbina	893,00 €/Turbina + 21 135,00 €
OPEX / ano	158 €/Turbina	1000,00€

Em termos de interesse, uma monitorização diária como é o caso do projeto com a *ONYX InSight* acaba por ser excessiva e mais cara. Com uma monitorização sistemática num intervalo de tempo adequado, por exemplo de 6 em 6 meses, obtém-se o mesmo resultado, uma vez que esta tecnologia permite detetar avarias com mais de 1 ano de antecedência. No caso do aparecimento de indícios de falha pode-se simplesmente realizar análises com uma periodicidade mais curta de forma a acompanhar a falha em desenvolvimento. Deste modo, entre os 2 projetos, conclui-se que o da *DMC* é o mais vantajoso.

A análise vibrométrica é a melhor opção de manutenção preditiva disponível no mercado atual para turbinas eólicas, pelo que a sua aplicação nos aerogeradores da *Finerge* deve ser considerada. Esta análise permite uma avaliação inicial do rolamento, tal como referido na subsecção anterior e ainda a monitorização ao longo da sua vida útil. No entanto, deve-se ter em consideração que a aplicação desta manutenção preditiva em grande escala se trata de um investimento elevado. É necessário compreender que este tipo de manutenção apenas deteta as falhas e não as evita, o que significa que embora seja possível minimizar os tempos de paragem dos aerogeradores, continuam a existir custos associados às falhas, como por exemplo o transporte dos rolamentos e as gruas para as operações de substituição. Para perceber se a aplicação desta manutenção é benéfica, é necessário perceber de que forma são reduzidos os tempos de paragem das turbinas eólicas, principalmente para os rolamentos traseiros. É de notar ainda que a percentagem de falhas nos modelos mais recentes é bastante reduzida, pelo que caso seja optado utilizar esta manutenção, é necessário ter em atenção quais os modelos a aplicar. Por último a idade do aerogerador também é um fator a ter em consideração. Existe também a opção de fazer esta análise de um modo não permanente, isto é, não aplicar sensores em todas as turbinas e ir fazendo análises vibrométricas ao longo do tempo com a reutilização dos sensores. Tal como referido previamente, esta opção tem desvantagens, uma vez que ao fazer várias análises ao mesmo rolamento, estas vão ter um erro associado, no entanto, não deixa de ser possível determinar se o rolamento apresenta indícios de falhas. É então necessário fazer uma análise económica bastante cuidada considerando todos os fatores referidos para perceber qual é a aplicação mais vantajosa desta manutenção.

5.2.3 Falha do rolamento

Como foi referido ao longo dos capítulos anteriores, a falta da realização de relatórios RCA aquando da falha de um rolamento, provocou um maior obstáculo na otimização da sua manutenção. Isto deve-se à impossibilidade de determinar uma causa definitiva para a falha destes rolamentos. Se as 25 falhas registados possuísem relatórios de análise de causa raiz, era concebível tentar determinar um padrão nas falhas dos rolamentos e por consequência detetar a origem da falha. Caso esta fosse determinada, seria possível corrigi-la e evitar que os rolamentos de aerogeradores futuros avariassem devido ao mesmo problema. Deste modo, considera-se que é de extrema importância realizar análises de causa raiz em todos os rolamentos dos aerogeradores da *Finerge* que avariem no futuro, sendo esta ação uma otimização relevante e crítica que podem realizar.

É de notar que a *Finerge* indica que a não ocorrência desta análise deve-se principalmente à dificuldade de disponibilidade imposta pela *ENERCON*. Assim, espera-se que mostrando a importância da realização desta análise, seja possível que a *Finerge* consiga em casos futuros estabelecer por meio de algum acordo a obrigatoriedade de análises RCA nas avarias dos componentes das suas turbinas eólicas.

5.3 Redução das causas de falha mais recorrentes

Uma vez que as causas de falha de rolamentos são desconhecidas devido à falta de relatórios RCA, não é possível corrigir a origem das falhas. No entanto, é possível atuar nas causas mais prováveis de ocorrência de avarias reduzindo desta forma a taxa de falhas dos rolamentos. Desta forma, são indicadas medidas para cada possível falha que permitem reduzir ou determinar a influência desta nos modelos em análise.

5.3.1 Fadiga

Como referido na secção 4.2 a análise realizada foi grosseira devido à falta de informação disponibilizada pelo fabricante que teve de ser colmatada com simplificações. Esta análise serve apenas como referência inicial para algum estudo futuro que a *Finerge* pretenda realizar.

Uma melhoria a efetuar é a realização de uma análise de cargas mais eficiente. Idealmente, esta análise deve ser feita com o devido software, obtendo assim valores mais fidedignos e próximos dos reais para as cargas a que os rolamentos estão sujeitos. Esta análise deve ter como prioridade os rolamentos críticos determinados no capítulo 3 e de preferência deve ser realizada com base nos campos eólicos com maior taxa de incidência de avarias (Tabela 3.6). No entanto, este estudo possui uma limitação crucial. É necessário conhecer informações relativas aos rolamentos em análise, algo que depende do fabricante dos aerogeradores. Deste modo, apenas faz sentido realizar esta análise caso se obtenham os dados referentes aos rolamentos.

5.3.2 Lubrificação

No capítulo anterior concluiu-se que é improvável que o lubrificante utilizado pela *ENERCON* seja um motivo para o aparecimento de avarias. Embora o lubrificante seja adequado existe a possibilidade de haver problemas na projeção do sistema de lubrificação que impeçam que este faça uma lubrificação satisfatória aos rolamentos. Deste modo, para determinar se a lubrificação é um fator responsável pela falha dos rolamentos dos modelos em análise, pode ser realizada um estudo ao sistema de lubrificação dos modelos e verificar se este foi alterado nos modelos mais recentes.

5.3.3 Contaminação

Das causas mais comuns de falhas de rolamentos, a contaminação do lubrificante é a mais salvaguardada pela *ENERCON*, uma vez que a manutenção que eles fazem aos rolamentos passa por analisar o lubrificante de 6 em 6 meses para garantir que estes não foram contaminados. No entanto a inspeção realizada é apenas visual, o que deixa espaço para melhoria. Deste modo é possível otimizar esta manutenção através de uma inspeção mais detalhada ao lubrificante dos rolamentos. Existe a possibilidade de enviar amostras do lubrificante usado para laboratórios próprios para uma análise mais detalhada destes, no entanto é necessário ter em atenção a relação custo-benefício. A *Finerge* possui acordos com a empresa *OelCheck*, uma empresa perita em lubrificação que permite realizar a análise referida. De forma a reduzir os custos, este estudo pode ser apenas complementar à análise de vibrações referida na subsecção 5.2.2, sendo que seria realizado quando um rolamento apresentar vibrações que sugiram indícios de falha.

Outra opção é a utilização de kits de análise de massa, como por exemplo os disponibilizados pela *SKF* que permitem realizar testes de consistência, contaminação e separação de óleo [35]. Desta forma é possível determinar se o lubrificante está contaminado, mesmo que este ainda não aparente indícios visuais.

5.4 Conclusões

Neste capítulo foram realizadas várias propostas de técnicas de manutenção que permitem garantir uma monitorização dos rolamentos fiável, tal como é o caso da análise de vibrações e também métodos de detetar a origem das falhas, como é o caso da RCA.

Estas duas propostas são as principais, sendo que as restantes, embora eficientes acabam por ser complementares a estas. No capítulo seguinte é analisado com mais detalhe de que modo se pode interligar as propostas referidas de forma a garantir à *Finerge* uma otimização da sua manutenção.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Na dissertação presente foi realizado um estudo a 255 turbinas eólicas da *Finerge*, nomeadamente às falhas de rolamentos dos modelos E-70 E4, E-82 E1, E-82 E2 e E-92. Tendo como base o registo de avarias entre os anos de 2012 e 2020, verificou-se que ocorreram 25 avarias criando um prejuízo total de, aproximadamente, 2,5 milhões de euros. Deste modo, foi estudado de que maneira é possível otimizar a manutenção dos rolamentos de modo a reduzir o número de falhas, estender a vida dos rolamentos e atuar de forma preditiva, detando as falhas com antecedência. Ao analisar as falhas ocorridas conclui-se que a taxa de incidência de avarias era superior nos modelos mais antigos e inferior nos mais recentes. O modelo E-70 E4 possui uma taxa de avaria de 50 %, o E-82 E1 de 29%, o E-82 E2 de 3% e o E-92 de 0%. Isto indica que os modelos mais antigos possam estar associados a falhas devido à incorreta projeção da turbina, sendo que para os casos mais recentes demonstram que estes erros já foram corrigidos. Outra possibilidade para a discrepância entra as taxa de falhas dos modelos, é a idade dos aerogeradores, uma vez que os modelos mais recentes possuem uma idade inferior aos modelos mais antigos. No entanto, devido ao elevado número de aerogeradores do modelo E-82, conclui-se que as falhas ocorridas devem-se a casos espontâneos, uma vez que todos os sistemas e mecanismos têm uma probabilidade de falha associada, por mais reduzida que seja.

No entanto, independentemente de uma falha se dever a uma projeção dos rolamentos indevida ou a uma situação ocasional, esta provoca prejuízo. Assim, é importante evitá-la ou reduzir os seus efeitos negativos nos casos em que isso não seja possível.

Para reduzir os prejuízos associados às falhas, foram realizadas uma série de propostas de melhoria da manutenção, que visam garantir à *Finerge* a capacidade de detetar as falhas com a devida antecedência. Desta forma, garante-se a existência de uma margem temporal suficiente para definir quais as ações a tomar tendo em vista uma otimização dos custos associados. Para além disso, foram ainda propostas técnicas que visam analisar os rolamentos, para no futuro, reduzir a ocorrência de falhas por completo. No entanto, é importante compreender que todas as propostas têm um custo associado, pelo que é necessário que a *Finerge* analise cada opção,

considerando a sua relação custo-benefício e que a seleção das propostas a aplicar é dependente do financiamento que a *Finerge* pretenda investir na realização da manutenção dos rolamentos.

Os principais métodos de manutenção a aplicar é a monitorização por análise de vibrações e a realização de RCA após a falha de um rolamento. A monitorização de vibrações é o método mais usual e mais eficaz presente no mercado atual. No entanto a sua aplicação a grande escala tem um preço bastante elevado. Assim, propõe-se a aquisição de um número reduzido de sensores pela *Finerge* com o intuito de se realizarem análises aos rolamentos de cada aerogerador de uma forma espontânea, como por exemplo num intervalo de 6 em 6 meses. Nos rolamentos em que sejam detetados sinais de degradação, aplicam-se os sensores de forma temporária e reforça-se a sua monitorização, realizando análises de vibração mais frequentes e complementando-as com análises à massa lubrificante dos mesmos, fazendo uso do acordo da *Finerge* com a *OelCheck*. Deste modo, ao manter o sensor numa posição fixa nos casos de rolamentos com indícios de falha, é possível averiguar a evolução da degradação do rolamento e controlá-lo de uma forma mais eficaz, conseguindo perceber com maior precisão a data em que a falha ocorrerá. Logo, é possível planear com antecedência medidas para estender a vida do rolamento. Quando este se aproximar da data da falha, é também possível planear as operações de substituição do rolamento, reduzindo o tempo de paragem do aerogerador. Em alguns casos, pode também ser possível efetuar várias substituições de rolamentos na mesma zona, otimizando as necessidades de transportes especiais e gruas, reduzindo assim alguns custos. Após a substituição do rolamento pode-se reutilizar o sensor para outros casos. Assim, mantendo um stock reduzido de sensores é possível fazer a monitorização a todos os rolamentos enquanto se aplicam alguns dos sensores de forma temporária aos casos mais críticos, sendo estes depois recolhidos e reutilizados. Posto isto, é possível evitar a aquisição de dois sensores por turbina eólica sem comprometer a eficácia da análise.

A realização da RCA é um fator chave para perceber a causa da avaria dos rolamentos. Sem a existência de relatórios RCA apenas é conhecido que os rolamentos falharam e não o porquê da falha. Ao realizar esta análise pode-se determinar a origem das falhas e tomar as ações corretivas necessárias para as eliminar. Assim sendo, os rolamentos passam a atingir a sua vida esperada e os custos associados a falhas dos rolamentos são eliminados por completo.

Estas são as duas técnicas de manutenção cruciais que devem ser aplicadas, sendo que as restantes são apenas complementares. A monitorização do lubrificante de uma forma mais exaustiva deve ser realizada aquando a deteção de um rolamento em degradação, de forma a auxiliar na identificação do problema e nas ações a serem tomadas para estender a vida do rolamento. A criação de equipas de supervisão do manuseamento dos rolamentos e a análise de vibrações no início do funcionamento de um rolamento serve para evitar e identificar, respetivamente, falhas pré-existentes no rolamento, evitando a utilização de rolamentos previamente danificados.

Em termos de trabalhos futuros, propõe-se a realização de uma análise de cargas e a análise do sistema de lubrificação, que têm como intuito descobrir possíveis causas para a ocorrência de avarias. Por este motivo faz mais sentido serem aplicadas nos modelos E-70 E4 e E-82 E1 uma vez que estes são os que têm uma maior taxa de incidência de falhas. A análise de cargas pretende avaliar o dimensionamento dos rolamentos, sendo que para ser realizada é necessário conhecer

os seus dados técnicos. Por último, a análise ao sistema de lubrificação é interessante, uma vez que já foi verificado que o problema não está no lubrificante. É relevante devido às preocupações reportadas pela *Finerge*, sendo que a lubrificação incorreta é das maiores causas de avarias nos rolamentos.

Referências

- [1] Teresa Leão e Hélder Gonçalves. Fórum Energias Renováveis em Portugal. 2020.
- [2] Finerge.
Disponível em: <https://www.fingerge.pt/pt/tudo-sobre-a-fingerge/>. Acesso em: 23 de Fevereiro de 2021.
- [3] Melissa Stark e Caroline Narich. New Value New Prospects - The future of onshore wind. 2017.
- [4] History of Europe's wind industry · WindEurope. Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/history/>. Acesso em: 16 de Março de 2021.
- [5] WindEurope Business Intelligence. Wind energy in Europe. 1992.
- [6] Alexandre Marx. An in-depth comparative study of direct drive versus gearbox wind turbines. 2018.
- [7] Edward Hart, Benjamin Clarke, Gary Nicholas, Abbas Kazemi Amiri, James Stirling, James Carroll, Rob Dwyer-Joyce, Alasdair McDonald, e Hui Long. A review of wind turbine main bearings: Design, operation, modelling, damage mechanisms and fault detection. *Wind Energy Science*, 5, 2020.
- [8] Enercon. Manual de instruções Aerogerador E-70 E4. 2009.
- [9] Enercon. Manual de instruções Aerogerador E-82 E2. 2010.
- [10] Enercon. Manual de operação Aerogerador E-92. 2014.
- [11] SKF. Rolamentos | SKF. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings>. Acesso em: 10 de Março de 2021.
- [12] Conecta FG. Rolamentos: Componentes e materiais. Disponível em: <http://conectafig.com.br/rolamentos-componentes-e-materiais/>. Acesso em: 9 de Março de 2021.
- [13] FAG. Caderno Técnico Sintomas - Causas - Soluções Oficina de Rolamentos. 2013.
- [14] FAG. FAG Rolling Bearings. 1999.
- [15] SKF. Lubrificação de rolamentos - Uma solução para cada aplicação | SKF. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/lubrication-management/lubricants>. Acesso em: 11 de Março de 2021.
- [16] FAG e Schaffler. *Rolling Bearings*. 2012.

- [17] SKF. Bearing damage and failure analysis. *SKF-the knowledge engineering company*, 2017.
- [18] SKF. SKF Avarias de Rolamentos.
- [19] SKF. Coroas de orientação. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/slewing-bearings>. Acesso em: 16 de Junho de 2021.
- [20] Corporation ReliaSoft. Life Data Analysis Reference. *Tools to Empower: The Reliability Professional*, 2015.
- [21] ReliaSoft Corporation. *Xfmea/RCM++ 10 Quick Start Guide*. 2016.
- [22] Alexander La Rosa. Root Cause Analysis and Monitoring Tools to work on complex platforms. Disponível em: <https://pandorafms.com/blog/root-cause-analysis/>. Acesso em: 14 de Junho de 2021.
- [23] Mike Lewis. Condition monitoring of wind turbine main shaft bearings, 2018.
- [24] Enercon. Descrição técnica Manutenção principal Aerogeradores E-82 E2 (CS82a).
- [25] Henrik Bredmose. Flow and forces around a wind turbine blade, 2016.
- [26] Alan Sulato de Andrade. Elementos orgânicos de máquinas ii at-102. 2016.
- [27] SKF. BT2-8143/HA1 - Tapered roller bearings, double row, TDO design. Disponível em: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/roller-bearings/tapered-roller-bearings/double-row-tapered-roller-bearings/productid-BT2-8143{%}2FHA1>. Acesso em: 16 de Junho de 2021.
- [28] 8.2. Main Bearing Damage Analyses. 2017.
- [29] Exxonmobil. Mobil SHC™ Grease 460 WT. 2015.
- [30] Enercon. Technical Report WEC 821925. 2017.
- [31] Jason Tranter. Bearing failure analysis, 2016.
- [32] DMC. Analisador de vibrações: análise do envelope. Disponível em: <https://www.dmc.pt/analizador-de-vibracoes-10-analise-do-envelope/>. Acesso em: 11 de Junho de 2021.
- [33] Weigang Wen, Zhaoyan Fan, Donald Karg, e Weidong Cheng. Rolling element bearing fault diagnosis based on multiscale general fractal features. *Shock and Vibration*, 2015:1–9, 10 2015.
- [34] DMC. Manutenção Preditiva: Medição e Análise de Vibrações em Diversos Aerogeradores. 2021.
- [35] SKF. Kit de análise de graxa. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/lubrication-management/manual-lubrication-tools/lubricant-analysis-tools/grease-test-kit>. Acesso em: 8 de Junho de 2021.

Anexo A

Dados para a análise de fiabilidade

Neste anexo estão presentes os dados relativos ao tempo até falha (Estado de falha, F) de um determinado rolamento ou tempo de operação de um rolamento que não falhou (Estado de suspensão, S).

Tabela A.1: Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-70 E4

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	15,84	702347
F	7,13	702348
F	6,99	702349
S	15,89	702350
S	15,86	702351
F	11,68	702658
S	15,32	702659
F	14,04	702660

Tabela A.2: Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-82 E1

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
F	12,89	82164
F	10,17	82165
S	15,32	82166
S	15,27	821926
S	13,83	821927
S	13,77	821928
S	13,81	821929
S	10,12	821930
S	10,28	821931

Continuação da tabela A.2 da página anterior

S	10,31	821932
S	9,85	822003
S	10,04	822010
S	10,30	822011
S	10,22	822012
S	11,03	822013
S	11,06	822014
S	11,18	822015
S	11,14	82107
S	11,12	82108
S	11,12	82109
S	11,12	82110
S	14,13	82111
F	11,25	82112
S	14,19	82113
S	14,10	822016
S	14,06	822017
S	13,99	822018
S	13,94	822019
S	11,06	822020
S	11,14	82886
S	11,27	82887
S	11,03	82888
S	10,99	82889
S	12,49	82890
F	11,53	82891
S	12,47	82892
S	12,47	82893
S	12,45	82894
S	12,44	82895
S	12,51	82896
S	12,60	82897
S	12,64	82898
S	12,59	82899
S	12,54	82900
S	12,62	82901
S	12,60	82902
S	12,50	821034
S	12,56	821035

Continuação da tabela A.2 da página anterior

S	12,50	821036
S	12,50	821037
S	12,06	821038
S	12,10	821039
S	12,12	821040
S	12,14	821041
S	12,16	821042
S	12,25	821043

Tabela A.3: Dados relativos ao rolamento traseiro do modelo E-82 E1

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	15,86	82164
F	12,23	82165
F	11,77	82166
S	15,27	821926
S	13,83	821927
S	13,77	821928
S	13,81	821929
S	10,12	821930
S	10,28	821931
S	10,31	821932
S	9,85	822003
S	10,04	822010
F	7,30	822011
S	10,22	822012
S	11,03	822013
S	11,06	822014
S	11,18	822015
S	11,14	82107
S	11,12	82108
S	11,12	82109
S	11,12	82110
S	14,13	82111
S	14,19	82112
S	14,19	82113
S	14,10	822016
S	14,06	822017

Continuação da tabela A.3 da página anterior

F	5,67	822018
S	13,94	822019
S	11,06	822020
F	5,85	82886
S	11,27	82887
S	11,03	82888
S	10,99	82889
S	12,49	82890
S	12,47	82891
S	12,47	82892
S	12,47	82893
S	12,45	82894
S	12,44	82895
S	12,51	82896
S	12,60	82897
S	12,64	82898
S	12,59	82899
S	12,54	82900
S	12,62	82901
S	12,60	82902
S	12,50	821034
S	12,56	821035
S	12,50	821036
F	10,52	821037
S	12,06	821038
S	12,10	821039
S	12,12	821040
S	12,14	821041
F	7,80	821042
S	12,25	821043

Tabela A.4: Dados relativos ao rolamento de yaw do modelo E-82 E1

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	15,86	82164
S	15,28	82165
S	15,32	82166
S	15,27	821926

Continuação da tabela A.4 da página anterior

S	13,83	821927
S	13,77	821928
S	13,81	821929
S	10,12	821930
S	10,28	821931
S	10,31	821932
S	9,85	822003
S	10,04	822010
S	10,30	822011
S	10,22	822012
S	11,03	822013
S	11,06	822014
S	11,18	822015
S	11,14	82107
F	10,34	82108
S	11,12	82109
S	11,12	82110
S	14,13	82111
S	14,19	82112
S	14,19	82113
S	14,10	822016
S	14,06	822017
S	13,99	822018
S	13,94	822019
S	11,06	822020
S	11,14	82886
S	11,27	82887
S	11,03	82888
S	10,99	82889
S	12,49	82890
S	12,47	82891
S	12,47	82892
S	12,47	82893
S	12,45	82894
S	12,44	82895
S	12,51	82896
S	12,60	82897
S	12,64	82898
S	12,59	82899

Continuação da tabela A.4 da página anterior

S	12,54	82900
S	12,62	82901
S	12,60	82902
S	12,50	821034
S	12,56	821035
S	12,50	821036
F	10,52	821037
F	7,58	821038
S	12,10	821039
F	11,43	821040
S	12,14	821041
F	7,80	821042
S	12,25	821043

Tabela A.5: Dados relativos aos rolamentos de pás do modelo E-82 E2

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	10,22	823514
S	11,03	823515
S	11,06	823516
S	11,18	823517
S	11,14	823518
S	11,12	823519
S	11,12	821924
S	11,12	821925
S	14,13	822004
S	14,19	822005
S	14,19	822006
S	14,10	822007
S	14,06	822008
S	13,99	822009
S	13,94	824312
S	11,06	824313
S	11,14	823155
S	11,27	823156
S	11,03	823157
S	10,99	823158
S	12,49	823159

Continuação da tabela A.5 da página anterior

S	12,47	823160
S	12,47	823161
S	12,47	823162
S	12,45	823163
S	12,44	823164
S	12,51	823165
S	12,60	823166
S	12,64	823167
S	12,59	823168
S	12,54	823169
S	12,62	823170
S	12,60	823171
S	12,50	823475
S	12,56	823476
S	12,50	823477
S	12,50	823478
S	12,06	823479
S	12,10	823480
S	12,12	823481
S	12,14	823482
S	12,16	823483
S	12,25	823484
S	12,23	823485
S	12,27	823486
S	12,33	823487
S	12,35	823488
S	9,90	823489
S	9,89	825034
S	9,79	825035
S	9,80	825036
S	9,79	825037
S	9,78	825038
S	9,40	825588
S	9,38	825589
S	11,00	825590
S	10,92	825591
S	10,93	825592
S	10,91	825593
S	10,87	825594

Continuação da tabela A.5 da página anterior

S	10,79	825595
S	8,89	825596
S	8,84	823348
S	9,66	823349
S	9,70	823350
S	9,72	823351
S	9,72	823352
S	9,74	823353
S	9,58	823354
S	9,60	823355
S	9,62	823356
S	9,60	823111
S	9,74	823112
S	9,74	823113
S	9,60	823114
S	9,60	823115
S	9,76	823116
S	9,62	823117
S	9,64	823118
S	9,64	823119
S	9,76	823120
S	9,78	824445
S	9,81	824446
S	9,82	824447
S	9,68	824448
S	9,70	822532
S	9,72	822533
S	9,74	822534
S	9,55	822535
S	9,53	822536
S	9,53	822537
S	9,53	822538
S	9,51	822539
S	9,65	822540
S	9,59	822541
S	8,11	822542
S	8,21	822543
S	8,22	822544
S	8,16	822545

Continuação da tabela A.5 da página anterior

S	8,07	822546
S	7,73	822547
S	7,75	822548
S	7,78	822549
S	7,86	822550
S	7,85	822551
S	7,67	822552
S	7,70	822553
S	7,82	822554
S	7,88	824443
S	9,96	824444
F	4,08	823490
S	9,93	823491
S	9,90	823492
S	9,85	823493
S	9,83	823494
S	9,81	823495
S	9,82	823496
S	9,80	823497
S	10,08	823498
S	10,05	823499
S	10,07	823500
S	10,03	823501
S	9,74	823502
S	9,78	823503
S	9,76	823504
S	9,78	823505
S	9,76	823506
S	9,75	823507
S	8,81	823508
S	8,78	823509
S	8,76	822555
S	8,74	822556
S	10,09	822557
S	10,12	822558
S	10,10	822559
S	10,08	822560
S	10,06	822561
S	10,01	822562

Continuação da tabela A.5 da página anterior

S	9,99	822563
S	9,96	822564
S	10,07	822565
S	10,08	822566
S	10,08	822567
S	10,02	822568
S	10,05	822569
S	10,02	822570
S	10,10	822571
S	10,08	822572
S	10,14	822573
S	10,15	822314
S	10,15	822315
S	10,15	822316
S	10,16	822317
S	10,15	822318
S	10,16	822319
S	8,86	822320
S	8,92	822321
S	9,85	822322
S	9,85	822323
S	9,89	822324
S	9,90	822325
S	9,74	822326
S	9,72	822327
S	9,80	822922
S	9,65	822923
S	9,64	822924
S	9,59	822925
S	9,58	822926
S	9,56	822927
S	9,62	822928
S	9,56	822929
S	9,68	822930
S	9,70	822931
S	9,70	822932
S	9,67	822933
S	10,28	822934
S	10,32	822935

Continuação da tabela A.5 da página anterior

S	10,33	822936
S	10,25	822937
S	10,30	822938
S	10,33	822939
S	10,33	822940
S	10,28	822941
S	10,30	822942

Tabela A.6: Dados relativos ao rolamento frontal do modelo E-82 E2

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	10,22	823514
S	11,03	823515
S	11,06	823516
S	11,18	823517
S	11,14	823518
S	11,12	823519
S	11,12	821924
S	11,12	821925
S	14,13	822004
S	14,19	822005
F	9,27	822006
S	14,10	822007
S	14,06	822008
S	13,99	822009
S	13,94	824312
S	11,06	824313
S	11,14	823155
S	11,27	823156
S	11,03	823157
S	10,99	823158
S	12,49	823159
S	12,47	823160
S	12,47	823161
S	12,47	823162
S	12,45	823163
S	12,44	823164
S	12,51	823165

Continuação da tabela A.6 da página anterior

S	12,60	823166
S	12,64	823167
S	12,59	823168
S	12,54	823169
S	12,62	823170
S	12,60	823171
S	12,50	823475
S	12,56	823476
S	12,50	823477
S	12,50	823478
S	12,06	823479
S	12,10	823480
S	12,12	823481
S	12,14	823482
S	12,16	823483
S	12,25	823484
S	12,23	823485
S	12,27	823486
S	12,33	823487
S	12,35	823488
S	9,90	823489
S	9,89	825034
S	9,79	825035
S	9,80	825036
S	9,79	825037
S	9,78	825038
S	9,40	825588
S	9,38	825589
S	11,00	825590
S	10,92	825591
S	10,93	825592
S	10,91	825593
S	10,87	825594
S	10,79	825595
S	8,89	825596
S	8,84	823348
S	9,66	823349
S	9,70	823350
S	9,72	823351

Continuação da tabela A.6 da página anterior

S	9,72	823352
S	9,74	823353
S	9,58	823354
S	9,60	823355
S	9,62	823356
S	9,60	823111
S	9,74	823112
S	9,74	823113
S	9,60	823114
S	9,60	823115
S	9,76	823116
S	9,62	823117
S	9,64	823118
S	9,64	823119
S	9,76	823120
S	9,78	824445
S	9,81	824446
S	9,82	824447
S	9,68	824448
S	9,70	822532
S	9,72	822533
S	9,74	822534
S	9,55	822535
S	9,53	822536
S	9,53	822537
S	9,53	822538
S	9,51	822539
S	9,65	822540
S	9,59	822541
S	8,11	822542
S	8,21	822543
S	8,22	822544
S	8,16	822545
S	8,07	822546
S	7,73	822547
S	7,75	822548
S	7,78	822549
S	7,86	822550
S	7,85	822551

Continuação da tabela A.6 da página anterior

S	7,67	822552
S	7,70	822553
S	7,82	822554
S	7,88	824443
S	9,96	824444
S	9,95	823490
S	9,93	823491
S	9,90	823492
S	9,85	823493
S	9,83	823494
S	9,81	823495
S	9,82	823496
S	9,80	823497
S	10,08	823498
S	10,05	823499
S	10,07	823500
S	10,03	823501
S	9,74	823502
S	9,78	823503
S	9,76	823504
S	9,78	823505
S	9,76	823506
S	9,75	823507
S	8,81	823508
S	8,78	823509
S	8,76	822555
S	8,74	822556
S	10,09	822557
S	10,12	822558
S	10,10	822559
S	10,08	822560
S	10,06	822561
S	10,01	822562
S	9,99	822563
S	9,96	822564
S	10,07	822565
S	10,08	822566
S	10,08	822567
S	10,02	822568

Continuação da tabela A.6 da página anterior

S	10,05	822569
S	10,02	822570
S	10,10	822571
S	10,08	822572
S	10,14	822573
S	10,15	822314
S	10,15	822315
S	10,15	822316
S	10,16	822317
S	10,15	822318
S	10,16	822319
S	8,86	822320
S	8,92	822321
S	9,85	822322
S	9,85	822323
S	9,89	822324
S	9,90	822325
S	9,74	822326
S	9,72	822327
S	9,78	824703
S	9,79	822921
S	9,80	822922
S	9,65	822923
S	9,64	822924
S	9,59	822925
S	9,58	822926
S	9,56	822927
S	9,62	822928
S	9,56	822929
S	9,68	822930
S	9,70	822931
S	9,70	822932
S	9,67	822933
S	10,28	822934
S	10,32	822935
S	10,33	822936
S	10,25	822937
S	10,30	822938
S	10,33	822939

Continuação da tabela A.6 da página anterior

S	10,33	822940
S	10,28	822941
S	10,30	822942

Tabela A.7: Dados relativos ao rolamento traseiro do modelo E-82 E2

Estado (Falha/ Suspensão)	Tempo até F/S / ano	ID
S	10,22	823514
S	11,03	823515
S	11,06	823516
S	11,18	823517
S	11,14	823518
S	11,12	823519
S	11,12	821924
F	5,45	821925
S	14,13	822004
S	14,19	822005
S	14,19	822006
S	14,10	822007
S	14,06	822008
S	13,99	822009
S	13,94	824312
S	11,06	824313
S	11,14	823155
S	11,27	823156
S	11,03	823157
S	10,99	823158
S	12,49	823159
S	12,47	823160
S	12,47	823161
S	12,47	823162
S	12,45	823163
S	12,44	823164
S	12,51	823165
S	12,60	823166
S	12,64	823167
S	12,59	823168
S	12,54	823169

Continuação da tabela A.7 da página anterior

S	12,62	823170
S	12,60	823171
S	12,50	823475
S	12,56	823476
S	12,50	823477
S	12,50	823478
S	12,06	823479
S	12,10	823480
S	12,12	823481
S	12,14	823482
S	12,16	823483
S	12,25	823484
S	12,23	823485
S	12,27	823486
S	12,33	823487
S	12,35	823488
S	9,90	823489
S	9,89	825034
S	9,79	825035
S	9,80	825036
S	9,79	825037
S	9,78	825038
S	9,40	825588
S	9,38	825589
S	11,00	825590
S	10,92	825591
S	10,93	825592
S	10,91	825593
S	10,87	825594
S	10,79	825595
S	8,89	825596
S	8,84	823348
S	9,66	823349
S	9,70	823350
S	9,72	823351
S	9,72	823352
S	9,74	823353
S	9,58	823354
S	9,60	823355

Continuação da tabela A.7 da página anterior

S	9,62	823356
S	9,60	823111
S	9,74	823112
S	9,74	823113
S	9,60	823114
S	9,60	823115
S	9,76	823116
S	9,62	823117
S	9,64	823118
S	9,64	823119
S	9,76	823120
S	9,78	824445
S	9,81	824446
S	9,82	824447
S	9,68	824448
S	9,70	822532
S	9,72	822533
S	9,74	822534
S	9,55	822535
S	9,53	822536
S	9,53	822537
S	9,53	822538
S	9,51	822539
S	9,65	822540
S	9,59	822541
S	8,11	822542
S	8,21	822543
S	8,22	822544
S	8,16	822545
S	8,07	822546
S	7,73	822547
S	7,75	822548
S	7,78	822549
S	7,86	822550
S	7,85	822551
S	7,67	822552
S	7,70	822553
S	7,82	822554
S	7,88	824443

Continuação da tabela A.7 da página anterior

S	9,96	824444
S	9,95	823490
S	9,93	823491
S	9,90	823492
S	9,85	823493
S	9,83	823494
F	5,98	823495
S	9,82	823496
S	9,80	823497
S	10,08	823498
S	10,05	823499
S	10,07	823500
S	10,03	823501
S	9,74	823502
S	9,78	823503
S	9,76	823504
S	9,78	823505
S	9,76	823506
S	9,75	823507
S	8,81	823508
S	8,78	823509
S	8,76	822555
S	8,74	822556
S	10,09	822557
S	10,12	822558
S	10,10	822559
S	10,08	822560
S	10,06	822561
S	10,01	822562
S	9,99	822563
S	9,96	822564
S	10,07	822565
S	10,08	822566
S	10,08	822567
S	10,02	822568
S	10,05	822569
S	10,02	822570
S	10,10	822571
S	10,08	822572

Continuação da tabela A.7 da página anterior

S	10,14	822573
S	10,15	822314
S	10,15	822315
S	10,15	822316
S	10,16	822317
S	10,15	822318
S	10,16	822319
S	8,86	822320
S	8,92	822321
S	9,85	822322
S	9,85	822323
S	9,89	822324
S	9,90	822325
S	9,74	822326
S	9,72	822327
S	9,78	824703
S	9,79	822921
S	9,80	822922
S	9,65	822923
S	9,64	822924
S	9,59	822925
S	9,58	822926
S	9,56	822927
S	9,62	822928
S	9,56	822929
S	9,68	822930
S	9,70	822931
S	9,70	822932
S	9,67	822933
S	10,28	822934
S	10,32	822935
S	10,33	822936
S	10,25	822937
S	10,30	822938
S	10,33	822939
S	10,33	822940
S	10,28	822941
S	10,30	822942

Anexo B

FMEA para os 4 modelos

Neste anexo encontram-se representados as análises de modo e efeito de falha realizadas a cada modelo. É indicado para cada rolamento a sua falha, o efeito que a falha provoca, o grau de severidade, S, possíveis causas, as suas probabilidades de ocorrência, O, e a probabilidade de detecção, D. Por último indica-se o número de prioridade de risco de cada falha, NPR.

Função	Falha	Efeito	S	Causa	O	D	NPR
Aerogerador E-70 E4							
Rolamento de pitch							
Permite a rotação das pás do aerogerador para manipular a velocidade de rotação do hub	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 3 dias)	3	Fadiga	1	5	15
				Má lubrificação	1	5	15
				Contaminação	1	5	15
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	15
Rolamento de yaw							
Permite a rotação da nacele para esta obter um melhor aproveitamento do vento, adaptando-se à sua direção	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 16 dias)	7	Fadiga	1	5	35
				Má lubrificação	1	5	35
				Contaminação	1	5	35
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	35
Rolamento principal frontal							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 9 dias)	6	Fadiga	3	5	90
				Má lubrificação	3	5	90
				Contaminação	2	5	60
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	2	5	60
Rolamento principal traseiro							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 140 dias)	10	Fadiga	1	5	50
				Má lubrificação	1	5	50
				Contaminação	1	5	50
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	50

Figura B.1: FMEA para o modelo E-70 E4. Relatório gerado no programa *ReliaSoft*.

Função	Falha	Efeito	S	Causa	O	D	NPR
Aerogerador E-82 E1							
Rolamento de pitch							
Permite a rotação das pás do aerogerador para manipular a velocidade de rotação do hub	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 3 dias)	3	Fadiga	1	5	15
				Má lubrificação	1	5	15
				Contaminação	1	5	15
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	15
Rolamento de yaw							
Permite a rotação da nacele para esta obter um melhor aproveitamento do vento, adaptando-se à sua direção	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 16 dias)	7	Fadiga	2	5	70
				Má lubrificação	2	5	70
				Contaminação	1	5	35
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	35
Rolamento principal frontal							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 8 dias)	6	Fadiga	3	5	90
				Má lubrificação	3	5	90
				Contaminação	2	5	60
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	2	5	60
Rolamento principal traseiro							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/-165 dias)	10	Fadiga	2	5	100
				Má lubrificação	2	5	100
				Contaminação	1	5	50
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	50

Figura B.2: FMEA para o modelo E-82 E1. Relatório gerado no programa *ReliaSoft*.

Função	Falha	Efeito	S	Causa	O	D	NPR
Aerogerador E-82 E2							
Rolamento de pitch							
Permite a rotação das pás do aerogerador para manipular a velocidade de rotação do hub	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 3 dias)	3	Fadiga	1	5	15
				Má lubrificação	1	5	15
				Contaminação	1	5	15
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	15
Rolamento de yaw							
Permite a rotação da nacele para esta obter um melhor aproveitamento do vento, adaptando-se à sua direção	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 16 dias)	7	Fadiga	1	5	35
				Má lubrificação	1	5	35
				Contaminação	1	5	35
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	35
Rolamento principal frontal							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 6 dias)	5	Fadiga	1	5	25
				Má lubrificação	1	5	25
				Contaminação	1	5	25
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	25
Rolamento principal traseiro							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 112 dias)	10	Fadiga	1	5	50
				Má lubrificação	1	5	50
				Contaminação	1	5	50
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	50

Figura B.3: FMEA para o modelo E-82 E2. Relatório gerado no programa *ReliaSoft*.

Função	Falha	Efeito	S	Causa	O	D	NPR
Aerogerador E-92							
Rolamento de pitch							
Permite a rotação das pás do aerogerador para manipular a velocidade de rotação do hub	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 3 dias)	3	Fadiga	1	5	15
				Má lubrificação	1	5	15
				Contaminação	1	5	15
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	15
Rolamento de yaw							
Permite a rotação da nacele para esta obter um melhor aproveitamento do vento, adaptando-se à sua direção	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 16 dias)	7	Fadiga	1	5	35
				Má lubrificação	1	5	35
				Contaminação	1	5	35
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	35
Rolamento principal frontal							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 6 dias)	5	Fadiga	1	5	25
				Má lubrificação	1	5	25
				Contaminação	1	5	25
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	25
Rolamento principal traseiro							
Permite a rotação do axle pin, elemento principal da nacele	Rolamento avaria	Paragem do aerogerador (+/- 112 dias)	10	Fadiga	1	5	50
				Má lubrificação	1	5	50
				Contaminação	1	5	50
				Outros (Manuseamento impróprio, mau transporte, montagem incorreta, etc.)	1	5	50

Figura B.4: FMEA para o modelo E-92. Relatório gerado no programa *ReliaSoft*.