



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carolina Leite Barbosa Cajazeira

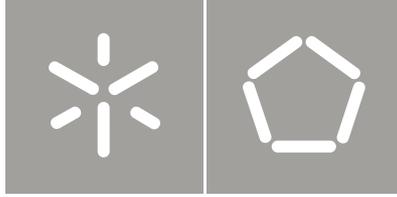
Estudo dos Fatores RAM na Fase de
Operação e Manutenção de Aerogeradores

Estudo dos Fatores RAM na Fase de
Operação e Manutenção de Aerogeradores

Carolina Leite Barbosa Cajazeira

UMinho | 2012

Janeiro de 2012



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carolina Leite Barbosa Cajazeira

Estudo dos Fatores RAM na Fase de
Operação e Manutenção de Aerogeradores

Tese de Mestrado
Engenharia Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Eusébio Manuel Pinto Nunes

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar forças e iluminar o meu caminho.

Ao meu pai Valter Cajazeira, à minha mãe Shirley Cajazeira e ao meu irmão Rafael Cajazeira que são as pessoas que sempre me acompanharam, que sempre foram minha base e mesmo estando no Brasil continuaram a me apoiar, contribuindo direta e indiretamente para este trabalho.

Ao meu marido José Manuel Sanjurjo que me dá muita motivação, força e paz. Me ajudou a enfrentar os novos desafios aqui em Portugal, sendo meu companheiro e me dando todo o apoio, amor e carinho.

À minha nova família na Espanha - a família do meu marido - que me acolheu e me dá muito apoio.

Ao professor Eusébio pela orientação, ensinamentos, atenção, paciência, seu exemplo como profissional e com todo seu conhecimento que me dá muita motivação.

À Mariana Carvalho pelas informações essenciais no desenvolvimento do estudo de caso, atenção e ajuda.

Ao professor Luis Dias pela importante ajuda com seu conhecimento avançado no tratamento dos dados.

Resumo

Com o alto grau de complexidade apresentado pelos sistemas e a crescente exigência do mercado é necessário estabelecer estratégias de competitividade de forma a minimizar a ocorrência de falhas e melhorar a produtividade. Os fatores RAM são uma estratégica integração da Fiabilidade, Disponibilidade e Manutibilidade que utiliza métodos, ferramentas e técnicas da engenharia para identificar e quantificar insuficiências de um equipamento ou sistema, que impedem o alcance de seus objetivos. Neste trabalho foram estudados os fatores RAM e evidenciadas suas diferentes técnicas, bem como a sua implicância no decorrer do ciclo de vida de sistemas. Neste contexto, o desempenho do sistema depende dos fatores RAM, os quais afetam diretamente os custos do ciclo de vida. Uma aplicação prática do estudo realizado permitiu avaliar o desempenho global de aerogeradores e encontrar oportunidades de melhoria do sistema.

Palavras - chave: RAM, Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e fatores RAM.

Abstract

With the high degree of complexity presented by systems and the increasing market demand is necessary to establish competitive strategies to minimize failures occurrence and improve productivity. Factors RAM is a strategic integration of Reliability, Availability and Maintainability using methods, tools and engineering techniques to identify and quantify failures of equipment or system that prevent the achievement of its objectives. In this work we studied the factors highlighted RAM and its different techniques, and their consequences during the life cycle of systems. In this context the performance of the system depends on factors of RAM, which directly affect the life cycle costs. A practical application of the study has allowed us to evaluate the overall performance of wind turbines and find opportunities to improve the system.

Keywords: RAM, Reliability, Availability, Maintainability and RAM factors.

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Considerações gerais sobre os fatores RAM	1
1.2	Enquadramento.....	2
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo principal	4
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Estrutura do trabalho.....	5
2.	Análise crítica da literatura	7
2.1	Introdução	7
2.2	Fatores RAM	7
2.3	Definições e interações entre os fatores RAM	9
2.3.1	Fiabilidade	10
2.3.2	Manutibilidade.....	16
2.3.3	Disponibilidade	17
2.4	Ciclo de vida de um sistema	18
2.5	Custos do ciclo de vida de um sistema	22
3.	Metodologias e Ferramentas.....	24
3.1	Introdução	24
3.2	Diagrama de Pareto	24
3.3	Cadeias de Markov	25
3.4	Técnica da frequência e duração	29
3.5	Manutenção Centrada na Fiabilidade.....	34
3.6	Manutenção Produtiva Total	36
3.7	O indicador de Eficiência Global do Equipamento	42
4.	Estudo de caso	45

4.1	Introdução	45
4.2	Enquadramento e objetivos.....	45
4.3	Descrição do sistema	46
4.4	Análise e tratamento dos dados.....	47
4.5	Identificação e caracterização do espaço de estados.....	50
4.6	Modelação do sistema	52
4.7	Simplificação do diagrama de estados.....	60
4.8	Índices de fiabilidade.....	64
4.9	Análise crítica dos resultados.....	67
5.	Conclusão e propostas de trabalhos futuros	70
	Referências Bibliográficas	72

Índice de Figuras

Figura 1: Gráfico da função densidade de probabilidade do tempo de falha ...	12
Figura 2: Relação entre função fiabilidade e função distribuição acumulada do tempo de falha.....	13
Figura 3: Curva da banheira - vida esperada de um item	14
Figura 4: Fases do ciclo de vida do sistema e a aplicação de RAM.....	20
Figura 5: Exemplo de Diagrama de Pareto	24
Figura 6: Diagrama de estados de um componente.....	27
Figura 7: Sistema de componente único	29
Figura 8: Exemplo de diagrama de estados de um sistema.....	31
Figura 9: Diagrama simplificado do sistema.....	33
Figura 10: Pilares do TPM.....	38
Figura 11: Perdas contabilizadas pelo OEE	42
Figura 12: Exemplo de sistema eólico.....	46
Figura 13: a) Gráfico dos 11 estados mais frequentes ao ano; b) Gráfico dos 11 estados mais permanentes ao ano	50
Figura 14: Diagrama de estados de aerogerador.....	53
Figura 15: Gráfico de probabilidade individual dos estados	57
Figura 16: Gráfico de frequência individual dos estados	58
Figura 17: Gráfico de duração média individual dos estados em minutos	59
Figura 18: Gráfico de tempo médio de ciclo entre estados em minutos.....	59
Figura 19: Diagrama de estados simplificado do sistema	60
Figura 20: a) Probabilidades dos estados agregados S_D , S_{DP} e S_F ; b) Frequências acumuladas dos estados agregados; c) Tempo médio de permanência nos estados agregados (em minutos).....	62
Figura 21: Diagrama reduzido de estados do sistema	63
Figura 22: a) Probabilidade dos estados agregados S_D e S_F ; b) Frequência dos estados agregados S_D e S_F ; c) Tempo médio de permanência nos estados do modelo reduzido (em minutos)	63
Figura 23: Gráfico de probabilidade do estado S_D no tempo.....	65
Figura 24: Probabilidades dos estados do aerogerador que compõem os estados agregados S_{DP} e S_F	67

Figura 25: Tempos médios de permanências nos estados do aerogerador que compoem os estados agregados S_{DP} e S_F 68

Índice de Tabelas

Tabela 1: Resumo das causas de falhas nas fases da curva da banheira.....	15
Tabela 2: Estrutura de registo dos dados.....	47
Tabela 3: Lista de estados do aerogerador.....	48
Tabela 4: Frequência dos estados por ano	49
Tabela 5: Tempo de permanência (min/ano).....	49
Tabela 6: Estados que constituem o espaço de estados	51
Tabela 7: Principais estados do aerogerador.....	51
Tabela 8: Tempo médio dos processos de transição do aerogerador 1 (minutos)	54
Tabela 9: Tempo total dos processos de transição (minutos)	54
Tabela 10: Tempos médios dos processos de transição (minutos/aerogerador)	54
Tabela 11: Matriz Q das taxas de transição entre estados (transições por minuto)	56
Tabela 12: Probabilidades dos estados em regime estacionário	56
Tabela 13: Estados em regime estacionário	57
Tabela 14: Estados do diagrama de estados simplificado	60

1. Introdução

1.1 Considerações gerais sobre os fatores RAM

Os fatores RAM (do inglês *Reliability, Availability and Maintainability*) têm vindo a assumir uma importância fundamental na estratégia competitiva das empresas industriais que operam com complexos sistemas tecnológicos num ambiente de concorrência global. Uma análise RAM baseia-se em conceitos e métodos da engenharia integrados e aplicados a partir de técnicas e ferramentas em todas as fases do ciclo de vida de um equipamento ou sistema. Uma maior ou menor importância dada aos fatores RAM na fase de projeto tecnológico ou de engenharia é particularmente notada na fase de operação e manutenção, principalmente, porque é nesta fase que se obtém o retorno dos investimentos, exigindo-se a maior eficiência e eficácia dos equipamentos e máxima disponibilidade. De acordo com McFadden (1990), melhorar a disponibilidade, fiabilidade e manutibilidade de processos e sistemas críticos é uma das mais rentáveis formas de aumentar a lucratividade de uma empresa cujo negócio se suporta em sistemas tecnológicos complexos.

A consideração da fiabilidade, disponibilidade e fatores de manutenção, que influenciam fortemente tanto a disponibilidade como os custos de ciclo de vida tornaram-se aspetos fundamentais no projeto de equipamentos e sistemas e na avaliação do seu desempenho operacional e económico. O processo de engenharia de maior fiabilidade, disponibilidade e manutibilidade, normalmente gera aumento de custos na fase de desenvolvimento e produção e, conseqüentemente, maiores custos de aquisição. Em contrapartida, resultam por esta via menos custos de operação e manutenção e maiores níveis de desempenho operacional. Justifica-se uma análise dos sistemas tecnológicos numa perspetiva mais ampla do seu ciclo de vida.

A fiabilidade, a disponibilidade e a manutibilidade de um sistema tecnológico devem ser estabelecidas desde a fase de conceção do projeto de engenharia. Estabelecer um programa RAM permitirá garantir que o projeto cuidará dos problemas relacionados com os fatores RAM e, conseqüentemente, impedir a ocorrência de problemas relacionados com a segurança, o meio ambiente, o

desempenho, o cronograma e as metas económicas (Guthrie, et al, 1990). Eventualmente, a relação entre o custo de investimento e a melhoria nos fatores RAM estará sujeita à lei dos rendimentos decrescentes, i.e., pequenas melhorias nos fatores RAM poderá exigir aumentos significativos nos contratos de conceção. Porém, pelo referido acima, as decisões deverão ser tomadas com base numa análise do ciclo de vida.

1.2 Enquadramento

Hoje em dia, os sistemas tecnológicos apresentam um grau de complexidade muito elevado resultante de uma crescente exigência dos clientes e de uma elevada competitividade do mercado. A evolução ocorrida nestes sistemas torna-os capazes de satisfazer a maioria dos requisitos funcionais presentes na sua conceção e, em alguns casos, exibem outras funcionalidades resultantes da necessidade da busca por um diferencial tecnológico. Segundo Sharma e Kumar (2008), muitas empresas para se manterem competitivas e fornecerem serviços precisos e atempadamente, começam a ver na fiabilidade e na manutenção boas oportunidades para melhorar a qualidade dos seus produtos/processos e serviços.

No processo de aquisição de um determinado equipamento ou sistema tecnológico, um bom caderno de encargos, com todos os requisitos fundamentais, é um elemento essencial para permitir a quem adquire estes equipamentos ou sistemas obter o máximo retorno dos seus ativos. De entre estes requisitos deverão salientar-se a Fiabilidade, a Disponibilidade e a Manutibilidade, referidos na bibliografia por fatores RAM, pela importância que estes assumem atualmente para as empresas que operam com sistemas tecnológicos (fase de Operação e Manutenção), mas também para as empresas que os projetam e produzem.

As implicações diretas dos fatores RAM no Custo do Ciclo de Vida (LCC - *Life Cycle Cost*) dos sistemas tecnológicos (produção, transportes, comunicações, energia, etc.) têm justificado o crescente destaque desta temática no âmbito da Engenharia Industrial. Deste modo, RAM é uma estratégica temática composta pela interligação de fatores que utilizam métodos, ferramentas e técnicas da

engenharia para identificar e quantificar insuficiências que impedem um equipamento ou sistema de alcançar os objetivos de desempenho inicialmente propostos.

A aplicação de processos de previsão da condição dos equipamentos, em paralelo com a execução por parte da função manutenção de ações de manutenção preventiva, conduzirá à obtenção de melhores resultados operacionais. Para tal torna-se necessário utilizar técnicas da fiabilidade para obter o conhecimento do correto funcionamento dos equipamentos que fundamentem a aplicação das melhores práticas de gestão. Para Sharma e Kumar (2008), é fundamental o conhecimento do comportamento dos equipamentos/sistemas, e dos seus componentes, a fim de planejar e adaptar as estratégias de manutenção adequadas. Consequentemente, pode obter-se maior eficiência na gestão da manutenção. Embora esta seja uma área muitas vezes esquecida pelos responsáveis das empresas atualmente, nomeadamente nas empresas de tecnologia intensiva. Ela tem merecido um grande interesse, após ter-se reconhecido o crescente potencial de rentabilização que pode proporcionar. De acordo com Parida e Kumar (2006), a eficiência e eficácia do sistema de manutenção desempenham um papel crucial no sucesso das organizações.

Para suprir a necessidade de caracterizar devidamente as anomalias que conduzem a um baixo rendimento global de um equipamento, pode-se utilizar indicadores de rendimento Operacional ou de Eficiência Global dos Equipamentos (OEE). Independentemente da estratégia utilizada, a qualidade de uma análise de fiabilidade depende muito da capacidade do analista para identificar todas as necessárias funções e, portanto, todas as falhas do item que está sujeita a análise (Rausand e Oien, 1996).

Na gestão de sistemas tem surgido uma procura por processos de melhoria de fiabilidade e da manutibilidade, que são os fatores necessários para a obtenção de uma maior disponibilidade dos equipamentos, levando à aplicação de estratégias de manutenção como a Manutenção Centrada na Fiabilidade – RCM (abordagem estruturada que incide sobre a fiabilidade e o planeamento da manutenção) (Nilsson e Bertling, 2007), ou o TPM (Total Productive

Maintenance) entre outros. Colocam-se, assim, desafios interessantes, cuja resposta terá de ser dada pelas direções das empresas através de uma metodologia global com vista à análise da fiabilidade, da manutibilidade e da disponibilidade dos sistemas.

Como se depreende, existem várias razões para o estudo dos fatores RAM de um sistema tecnológico, entre as quais se destacam: a necessidade de responder a um processo contratual; a otimização de políticas de manutenção, normalmente recomendadas pelo fornecedor mas estabelecidas em contexto diferentes da realidade industrial; o controlo dos custos de operação e manutenção em equipamentos/sistemas complexos; a obtenção de indicadores de desempenho operacional ou o cumprimento dos regulamentos de segurança.

Do ponto de vista económico os custos de operação e manutenção (CO&M) em sistemas tecnológicos são geralmente muito consideráveis, podendo transformar-se na relação cliente – fornecedor, num elemento fulcral para a existência de futuros negócios. Para um gestor de manutenção, trata-se de uma área com um elevado potencial de ganho para qualquer empresa que opera com sistemas tecnológicos e, nestes estão incluídos sistemas eólicos de produção de energia eléctrica, sobre os quais incide o estudo dos fatores RAM apresentado neste trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo principal

O principal objetivo deste projeto consiste na análise e avaliação dos fatores RAM em sistemas eólicos de produção de energia e estudar a sua importância relativa na gestão da manutenção e no custo do ciclo de vida destes sistemas, em especial no custo de Operação e Manutenção. A concretização deste projeto é parte dos requisitos necessários à conclusão do curso de Mestrado em Engenharia Industrial atualmente em curso pelo que este também é um objetivo importante deste projeto.

1.3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste projeto:

- 1) Sintetizar conhecimento sobre fatores RAM e sua importância nas diferentes fases do ciclo de vida de sistemas tecnológicos em geral e de sistemas eólicos de produção de energia em particular;
- 2) Procurar os melhores métodos para a análise do comportamento fiabilístico e da manutibilidade de componentes de um sistema eólico de produção de energia, com vista à determinação dos modos críticos de falhas dos seus subconjuntos ou órgãos;
- 3) Estudar as principais metodologias de avaliação dos fatores RAM na fase de Operação e Manutenção;
- 4) Aplicar estas metodologias na avaliação dos fatores RAM de um sistema eólico de produção de energia (estudo de caso) e discutir a sua validade/adequabilidade;
- 5) Propor medidas de melhoria da performance do sistema.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

O primeiro capítulo é a introdução do trabalho onde é apresentado o tema, o seu enquadramento e objetivos.

No segundo capítulo é feita uma revisão crítica da literatura sobre os fatores RAM, suas interações e aplicações. O objetivo é apresentar uma breve descrição qualitativa e quantitativa dos fatores, destacando a importância da sua aplicação em todas as fases do ciclo de vida de sistemas e nos respetivos custos.

No capítulo três são evidenciadas algumas metodologias e ferramentas de análise de fiabilidade que foram utilizadas no desenvolvimento do estudo de caso.

No capítulo quatro está desenvolvido o estudo de caso, com a análise crítica dos resultados obtidos pela aplicação das Cadeias de Markov e demais ferramentas estudadas.

O capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho realizado e propostas de trabalhos futuros.

2. Análise crítica da literatura

2.1 Introdução

O processo de investigação iniciou-se com a revisão bibliográfica de material publicado entre fontes primárias (livros técnicos); fontes secundárias (artigos científicos, jornais e dissertações de mestrado), assim como fontes terciárias (Repositorium e B-on), que permitiram o acesso às fontes secundárias.

Esta pesquisa bibliográfica contribuiu para a consolidação de conceitos associados aos fatores RAM, mais especificamente, permitiu perceber a importância da fiabilidade, da disponibilidade e da manutibilidade no desempenho operacional de um sistema industrial tecnológico e no apoio à tomada de decisões mais fundamentadas e de melhor qualidade. Permitiu ainda melhorar o conhecimento das ferramentas estatísticas mais utilizadas na avaliação dos fatores RAM. A revisão crítica da literatura, também possibilitou fundamentar a investigação a ser desenvolvida com o propósito de se fazer uma abordagem dedutiva, testando-se conceitos da teoria com dados reais.

2.2 Fatores RAM

Na bibliografia encontram-se vários trabalhos desenvolvidos sobre o estudo dos fatores RAM em sistemas. McFadden (1990), propôs técnicas para o desenvolvimento de uma base de dados dos fatores RAM para um programa de melhoria de um sistema industrial. A partir de orientações de um programa estruturado, Guthrie et al., (1990) apresentaram a integração dos fatores RAM em cada uma das fases de um projeto. Markeset e Kumar (2001), discutiram a aplicação de fiabilidade, manutibilidade e métodos de análise de risco para minimizar o custo de ciclo de vida de um sistema produtivo. Markeset e Kumar (2003-a), avaliaram a fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e o suporte ao produto de um sistema para analisar as necessidades de manutenção, e os custos, e sugeriram melhorias. Num outro trabalho destes autores (Markeset e Kumar 2003-b) é apresentada uma abordagem de integração dos fatores RAMS para fazer uma análise de risco nas fases de conceção, desenvolvimento e fabricação de um produto. Rajpal et al (2006), aplicaram redes neuronais artificiais para modelar o comportamento de um sistema

complexo e reparável, e baseados no estudo dos fatores RAM, formularam estratégias de otimização da operação do sistema. Herder et al (2008), construíram um modelo dos fatores RAM da GE Plásticos da Holanda. O modelo foi usado para avaliar duas decisões-chave que foram tomadas pela empresa sobre o funcionamento e políticas de paragens da planta industrial. Markeset e Kumar (2004), fizeram uma análise para melhorar o desempenho da integração de RAMS (fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e suporte ao produto) na fase de projeto do produto numa indústria. O objetivo era melhorar os seus processos de trabalho, desenvolver produtos com bom desempenho, maior eficácia e com o menor custo. Eti et al (2006), abordaram a integração dos fatores RAMS (fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e segurança) e análise de risco a fim de reduzir a frequência de falhas e custos de manutenção de um sistema. Cauffriez, et al (2006), propuseram o formalismo de técnicas de análise estruturada de avaliação da fiabilidade de sistemas complexos, no que diz respeito à quantificação de parâmetros RAMS. Sharma e Kumar (2008) apresentaram a aplicação da análise dos fatores RAM numa indústria de processo para analisar o comportamento do seu sistema e, assim, adotar e praticar políticas e estratégias de manutenção adequadas para melhoria de desempenho. Kumar (2008) apresentou uma análise dos fatores RAM de um terminal de comunicação por satélite transportáveis (SATCOM). Sikos e Klemes (2009) modelaram um sistema de gestão de resíduos usando software de RAM e de segurança para prever as medidas de desempenho de sistemas de gestão de resíduos e identificarem a decisão ótima. Vint e Vint (2007) descreveram um sistema integrado com um programa dos fatores RAMS (fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e segurança), que foi elaborado e estabelecido para o cumprimento de requisitos do cliente no desenvolvimento do projeto de fiabilidade e segurança. Komal et al (2010), deram, no seu artigo, uma ideia de como podemos estimar os parâmetros RAM de sistemas complexos, utilizando as informações disponíveis e dados incertos e utilizando algoritmos genéticos para poder analisar o comportamento dos sistemas e melhorar o seu desempenho através da adoção de estratégias de manutenção adequadas.

2.3 Definições e interações entre os fatores RAM

RAM refere-se a fiabilidade, disponibilidade e facilidade de manutenção, de um sistema. São fatores interligados que, em níveis satisfatórios, se tornam essenciais na busca da melhoria contínua e no cumprimento de requisitos dos sistemas tecnológicos. Segundo Wikstrom, et al (1998), estes fatores estão inter-relacionados de tal forma que é necessário ter a fiabilidade alta e uma boa manutenção, a fim de alcançar uma alta disponibilidade.

A fiabilidade tem-se tornado um requisito obrigatório para se atingirem metas de produtividade industrial, metas de disponibilidade, manter o funcionamento e os custos de manutenção dentro do esperado com a possibilidade de aumento futuro de produtividade. A fiabilidade é considerada como a probabilidade de sucesso no desempenho de uma operação ou sistema, com uma mínima perda ou falha. Requer uma avaliação dos efeitos das falhas dos sistemas e equipamentos inerentes, determinando se os resultados de produção são como os planeados e se são rentáveis, ou não. A fiabilidade é de interesse para o processo industrial do ponto de vista da engenharia de manutenção porque ela ajuda a determinar o quê e quanto da manutenção deve ser executada (Herder, et al, 2008). Em análises de fiabilidade deve ser feita uma avaliação da acessibilidade e "reparabilidade", ou seja, conhecer o nível de manutibilidade dos sistemas inerentes e os seus equipamentos relacionados em caso de falha, bem como a paragem de sistemas integrados durante a manutenção planeada. É importante estudar e conhecer o comportamento do sistema, e de seus componentes, relacionando a sua fiabilidade e manutibilidade, a fim de planejar e adaptar as estratégias de manutenção adequadas.

Segundo Komal, et al, (2010) as falhas de unidades industriais são geralmente causadas por manutenção inadequada e incapacidade de prever os problemas que podem ocorrer mais tarde durante o uso dos equipamentos.

Conhecendo a fiabilidade e manutibilidade de um sistema, percebe-se a forte influência destes dois fatores na sua disponibilidade. A disponibilidade exige uma avaliação das consequências de operação, da integração de sistemas, e avalia os requisitos essenciais e necessários para a operação de reparação.

Tais avaliações darão uma previsão da capacidade de um equipamento ou sistema estar disponível para uso ou funcionamento pois são essenciais na garantia de alta disponibilidade.

A análise RAM pode ser aplicada sistematicamente em sistemas de engenharia, unidades industriais ou em todas as atividades económicas que recorram a equipamentos/ sistemas tecnológicos, em todas as fases do ciclo de vida, nomeadamente:

- Aeronáutica e espaço aéreo;
- Infraestruturas críticas;
- Produção e distribuição de energia;
- Tecnologia da informação e telecomunicações;
- Manufatura;
- Engenharia nuclear;
- Indústria química;
- Transportes.

Uma análise RAM incide sobre as falhas, prevenção de falhas e redução das consequências das falhas de um equipamento/sistema. Avalia o desempenho dos equipamentos em diferentes fases do ciclo de vida melhorando e prevendo o desempenho dos mesmos. Para isso, são utilizados diversos conhecimentos da engenharia para a gestão das várias componentes de RAM. Os métodos, as ferramentas e as técnicas de análise destinam-se a identificar e a quantificar todas as insuficiências que impeçam o equipamento de alcançar os objetivos de desempenho inicialmente propostos (NP EN 50126, 2000).

É importante conhecer e compreender o método de análise e cálculo dos fatores, pois as definições dos termos são baseadas em estatísticas, e são apresentados nas secções seguintes.

2.3.1 Fiabilidade

A economia globalizada, o aumento da procura por produtos e sistemas de alto desempenho a custos reduzidos e a necessidade de redução da probabilidade de falhas em um produto resultou na maior atenção para a fiabilidade. Nas

fases de operação e manutenção de um sistema a alta e constante fiabilidade é considerada um parâmetro de eficiência para a produção (Lanza, et al, 2009).

Ramakumar (1993), refere que a fiabilidade de um sistema é a probabilidade deste poder executar a função pretendida para um intervalo especificado de tempo sob condições estabelecidas. Fogliatto e Ribeiro (2009), dizem que a definição de fiabilidade implica especificação do propósito ou uso pretendido para o item em estudo.

A fiabilidade é confundida com a qualidade, a qual traduz a descrição estática de um item ou produto, e a fiabilidade é o desempenho deste item com o decorrer do tempo.

O investimento em fiabilidade dá maior possibilidade de se ter uma operação bem sucedida de um produto ou sistema.

Matematicamente a função fiabilidade $R(t)$, ou função de sobrevivência, é definida na Equação (1):

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (1)$$

Onde: t é o tempo de missão

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha.

Por tempo de falha de um item (componente, produto, equipamento ou sistema) entende-se o tempo que decorre desde que o item é colocado em operação até à sua primeira falha (Fogliatto e Ribeiro, 2009). A fiabilidade está relacionada com o tempo de vida até à falha no instante T , uma variável aleatória que assume valores no intervalo $[0, +\infty)$ e pode ser interpretada como a frequência relativa da ocorrência de falhas por unidade de tempo. A Figura 1 mostra um exemplo de representação gráfica da função densidade de probabilidade da distribuição normal. No início da vida e no fim da vida de um componente existe uma menor probabilidade de sobrevivência.

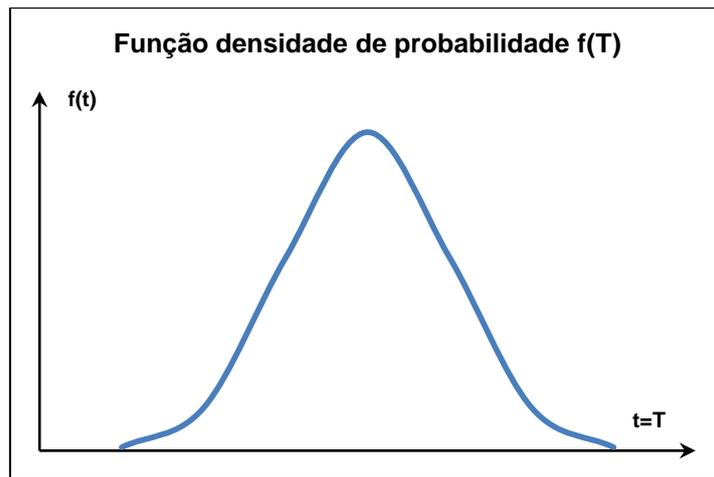


Figura 1: Gráfico da função densidade de probabilidade do tempo de falha

Em estudos de Fiabilidade, é fundamental saber qual a distribuição do tempo de vida aplicável aos itens sob consideração, de modo que possam ser feitas previsões sobre a população dos itens. Isto possibilita descrever a ocorrência de falhas sobre a população dos itens. Algumas das distribuições mais importantes nestes estudos são:

- **Distribuição Normal** - É de utilização restrita, aplicando-se tipicamente à descrição de fenómenos de desgaste mecânico, caracterizados pelo aumento crescente da taxa de falhas com o tempo.
- **Distribuição Lognormal** - A distribuição lognormal aplica-se quando as variáveis aleatórias interagem multiplicativamente, ao invés de aditivamente, como ocorre com a distribuição normal. É a que melhor se adapta aos dados de ensaios de vida, onde os mecanismos de falha envolvem interações químicas e físico-químicas.
- **Distribuição Exponencial** - Fogliatto e Ribeiro (2009), afirmam que a distribuição exponencial é importante em estudos de fiabilidade por ser a única distribuição contínua com taxa de falhas constante. A distribuição exponencial é talvez a mais usada no campo da Fiabilidade, principalmente para sistemas complexos.
- **Distribuição de Weibull** - Em casos em que as taxas de falhas não podem ser consideradas constantes, não sendo, portanto possível a

aplicação da distribuição exponencial, uma alternativa é usar a distribuição de Weibull. Esta resulta de uma generalização da distribuição exponencial, através da introdução de determinados parâmetros, de modo a torná-la adaptável à ocorrência de vários fenômenos, como por exemplo, o de fadiga metálica. Pinto (2002), afirma que a variação desses parâmetros permite considerar os casos de taxa de avaria constante, crescente e decrescente.

Outra função que caracteriza um item é a função da não fiabilidade - $F(t)$. A função de distribuição acumulada $F(t)$ representa a probabilidade cumulativa de ocorrência de falhas até ao instante t . Sendo assim, a fiabilidade, tem relação inversa com a função distribuição acumulada de falhas, como mostra o exemplo de representação gráfica na Figura 2.

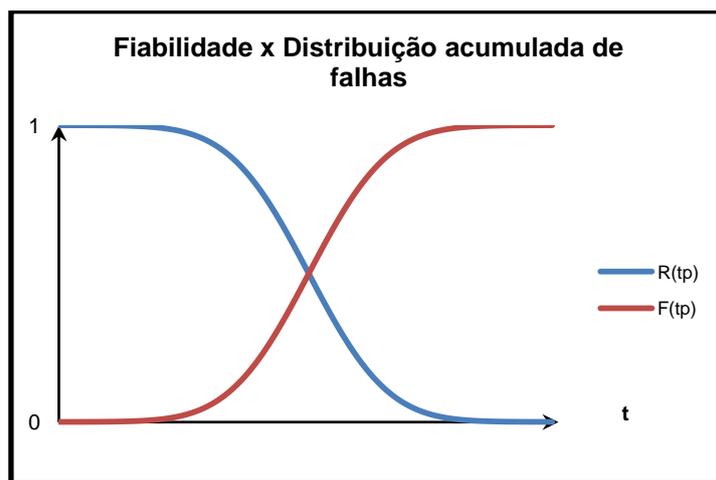


Figura 2: Relação entre função fiabilidade e função distribuição acumulada do tempo de falha

A partir da função densidade de probabilidade pode obter-se a função de distribuição acumulada que representa a probabilidade de falha no intervalo $(0,t]$, então tem-se a Equação (2):

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (2)$$

Taxa de falhas $\lambda(t)$ e a Curva da Banheira

A taxa de falhas é a derivada em ordem ao tempo do número esperado de falhas até ao instante t . O seu valor representa falhas por unidade de tempo e calcula-se pela Equação (3):

$$\lambda(t) = \frac{d E[N(t)]}{dt} \quad (3)$$

A representação gráfica de $\lambda(t)$ mostra o comportamento da taxa de falhas de um item no decorrer do tempo. Esta é uma análise extremamente importante para o entendimento da taxa de falhas da maioria dos itens de vida longa. Para muitos itens, nomeadamente itens metalomecânicos, esta representação gráfica é vulgarmente conhecida pela curva da banheira.

A curva da banheira caracteriza-se por três fases, como mostra a Figura 3:

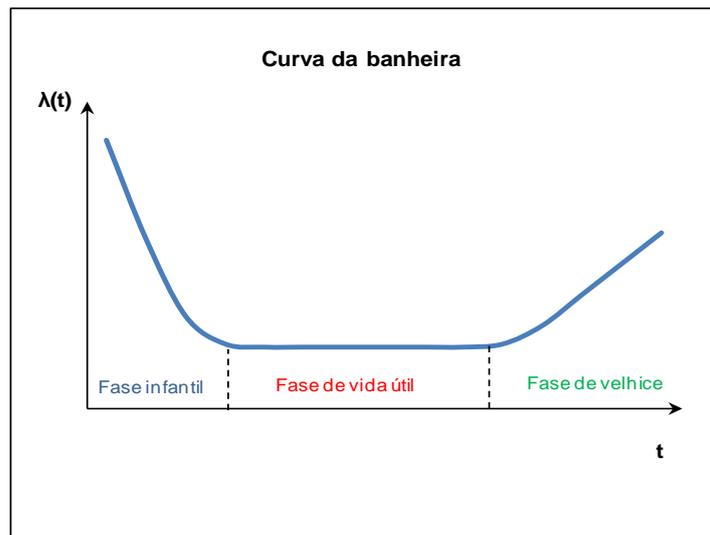


Figura 3: Curva da banheira - vida esperada de um item

- **Fase infantil - Período das falhas prematuras ou mortalidade infantil**
- Intervalo inicial de curta duração no qual falha uma pequena percentagem da população, devido a deficiências de fabricação, levando a falhas prematuras.
- **Fase de vida útil - Período de taxa de falhas constante** - Período mais significativo por ter maior duração que os demais períodos, com a

taxa de falhas constante. As falhas são casuais e provocadas por vários motivos como a aplicação indevida do produto e abusos, entre outros.

- **Fase de velhice ou desgaste** - Intervalo de tempo durante o qual a taxa de falhas cresce continuamente em comparação com a taxa de falhas do período de vida útil, devido a processos de envelhecimento e outras causas.
- Um resumo das causas de falhas nas diferentes fases da Curva da Banheira está apresentado na Tabela 1 (adaptado de Lafraia, 2001).

Tabela 1: Resumo das causas de falhas nas fases da curva da banheira

Falhas prematuras	Falhas Casuais	Falhas por Desgaste
Processos de fabricação deficientes	Interferência indevida tensão/resistência	Envelhecimento
Controle de qualidade deficiente	Fator de segurança insuficiente	Desgaste abrasão
Mão de obra desqualificada	Cargas aleatórias maiores que as esperadas	Degradação de resistência
Amaciamento insuficiente	Resistência menor que a esperada	Fadiga
Debugging insuficiente	Defeitos abaixo do limite de sensibilidade dos ensaios	Fluência
Materiais fora de especificação	Erros humanos durante uso	Corrosão
Componentes não especificados	Aplicação indevida	Deterioração mecânica, elétrica, química ou hidráulica
Componentes não testados	Abusos	Manutenção insuficiente ou deficiente
Componentes que falharam devido estocagem/transporte indevido	Falhas não detetáveis pelo melhor programa de manutenção preventiva	Vida de projeto muito curta
Sobrecarga no primeiro teste	Falhas não detetáveis durante o melhor debugging	
Contaminação	Causas inexplicáveis	
Erro humano	Fenômenos naturais imprevisíveis	
Instalação imprópria		

2.3.2 Manutibilidade

A manutibilidade é uma característica do projeto que define a facilidade de realização de atividades de manutenção num sistema.

O MTTR é definido como a média da distribuição do tempo de reparação de um sistema. Sharma e Kumar (2008) afirmam que uma figura-chave da manutibilidade de mérito é o tempo médio de reparação (MTTR – *Mean Time to Repair*) e um limite para o tempo máximo de reparação. O MTTR para o sistema poderá ser obtido pela média ponderada dos tempos de reparação de cada modo de falha. A ponderação é feita pela respetiva taxa de falha como se pode ver na Equação (4):

$$MTTR = \frac{\sum \lambda t_r}{\sum \lambda} \quad (4)$$

Onde:

t_r = tempo de reparação do modo de falha r

Ou pode-se obter pela taxa de reparação de acordo com a Equação (5):

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Onde:

μ = taxa de raparação

MTTR é dado também pelo total de tempo de manutenção corretiva (tempo necessário para execução de ações com resultado de uma falha, para restabelecer o equipamento / sistema à condição operacional), dividido pelo total de número de ações corretivas (ações resultantes da não operacionalidade de equipamentos e sistemas) durante determinado período de tempo, ou seja é a média ponderada dos tempos de cada modo de falha. Como afirmam Sharma e Kumar (2008), é medido com base no total do tempo de manutenção, incluindo todo o tempo para: diagnóstico, resolução de problemas, desmontagem, remoção / substituição, tempo de reparação ativa,

testes de verificação, em que a reparação é adequada, os atrasos nos movimentos logísticos e atrasos no tempo dedicado a tarefas administrativas.

Por exemplo, uma ação de reparação num gerador eólico é levada a cabo por uma equipa de pessoas que se deslocam ao aerogerador e tentam determinar a causa da falha antes de começarem a reparação propriamente dita. O tempo de reparação pode demorar alguns minutos ou horas, até alguns dias. A redução do esforço de manutenção pela manutibilidade aplicada no projeto é essencial para a disponibilidade operacional e para os custos de operação e manutenção.

2.3.3 Disponibilidade

A disponibilidade desempenha um papel fundamental na capacidade de produção efetiva e retornos financeiros de um sistema. As preocupações com a análise e a avaliação da disponibilidade são grandes quando a perda da função envolve altos custos. Estas análises possibilitam a identificação dos componentes/equipamentos essenciais ou críticos de um sistema. Segundo Lundteigen et al (2009), a falta de disponibilidade adequada pode levar à retirada do produto, processo judicial, ou a perda de quota de mercado e reputação.

Segundo a Norma NP EN 13306 (2007), a disponibilidade é a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, durante um dado intervalo de tempo, sob determinadas condições, assumindo que é assegurado o fornecimento dos recursos necessários. A disponibilidade é o aspeto de fiabilidade do sistema que depende de uma manutenção eficiente e eficaz.

O tempo médio até falhar (MTTF – *Mean Time to Failure*) é o tempo médio para falha de componentes que não podem ser reparados (Lafraia, 2001). Matematicamente a Equação (6) define que o MTTF é o tempo total acumulado de uma população de um item não reparado dividido pelo número total de falhas dentro do intervalo medido:

$$MTTF = \frac{t}{f} = \frac{1}{\lambda_{cum}} \quad (6)$$

O tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failure*). Matematicamente é o tempo total acumulado de uma população de um item reparado dividido pelo número total de falhas do intervalo medido, assumindo que não existe tendência na ocorrência de falhas, representado pela Equação (7):

$$MTBF = \frac{t}{f} = \frac{1}{\lambda_{cum}} \quad (7)$$

Para um equipamento com m componentes, de idades diferentes, e que são imediatamente substituídos quando avariam, a relação entre o MTBF do equipamento e os MTTF dos componentes individuais, considerando que os componentes têm fiabilidade exponencial e em série, é mostrada na Equação (8):

$$\frac{1}{MTBF} = \sum_j^m \frac{1}{MTTF_j} \quad (8)$$

Assim, a disponibilidade, para um sistema no regime estacionário, é dada pela Equação (9):

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (9)$$

O conhecimento da disponibilidade do sistema e sua relação com os custos de operação e manutenção permite o conhecimento da qualidade de produção e o desempenho económico do sistema.

2.4 Ciclo de vida de um sistema

O ciclo de vida de um sistema é o intervalo de tempo que se inicia com a sua conceção e termina com o seu desmantelamento ou eliminação. Nas fases de desenvolvimento/projecto e de fabricação de um sistema é necessário identificar os requisitos/necessidades do cliente. É fundamentalmente no

decorrer deste processo que deverão ser aplicados os conceitos RAM, embora devam ser considerados em todas as fases do ciclo de vida.

Segundo Morais (2005) as fases de vida de um equipamento/sistema são:

1. **Projeto concetual** – fase que mais afeta os custos visto que caracteriza a complexidade do sistema, definindo os processos a serem realizados e como serão executadas as suas funções. Também determina a competitividade no mercado, pois, é nesta fase que o sistema pode sofrer alterações para aumentar a fiabilidade e tornar mais fácil a execução de atividades de manutenção, melhorando, conseqüentemente, a manutibilidade e disponibilidade do sistema.
2. **Projeto preliminar e final** – No projeto preliminar são determinados os detalhes do projeto como materiais, propriedades do sistema, layout, dimensões e formas do sistema. É conveniente a definição de materiais semelhantes e subsistemas modulares para melhorar a manutibilidade. E é no projeto final que estas decisões são tomadas, com a devida elaboração de documentos técnicos.
3. **Planeamento do processo de fabricação** – Nesta fase são decididos quais serão os processos de produção e definido como será feita a seleção de equipamentos, maquinaria e ferramentas.
4. **Fabricação do sistema** – Esta fase está relacionada com o fabrico do sistema, definindo-se qual será a produção e demais atividades envolvidas, obtêm-se materiais, define-se como será a montagem, faz-se o controlo de qualidade e finalmente realizam-se testes ao sistema.
5. **Venda, distribuição e instalação** - Nesta fase efetua-se a venda, distribuição e instalação do sistema. Este processo depende de boas decisões quanto às prestações de serviços logísticos, influenciando diretamente a satisfação do cliente. Para a instalação devem ser seguidos corretamente os procedimentos e normas de segurança.

6. Operação e manutenção – Esta é a fase do funcionamento e utilização do sistema. É a fase de maior duração e que depende do que foi definido na fase concetual para ter bom desempenho. Nela também são realizadas as atividades de manutenção. Os dados recolhidos durante a operação do sistema auxiliará na decisão de estratégias de manutenção adequadas.

7. Desativação e Desmantelamento – Esta é a fase final do sistema caracterizada pelo seu desligamento e desmantelamento.

Os sistemas industriais têm tentado atender às expectativas dos clientes com produtos que cumpram as suas funções e com baixo custo de ciclo de vida. Em muitas ocasiões os produtos não têm eficácia no seu desempenho por deficiências de projeto ou de manufatura, acarretando em custos inesperados. À medida que aumenta a exigência por produtos com bom desempenho, cresce também a procura de produtos com um custo de ciclo de vida previsível. Em casos como este, o problema pode ser revertido com uma aplicação dos fatores RAM em todas as fases do ciclo de vida do produto, resumido na Figura 4.

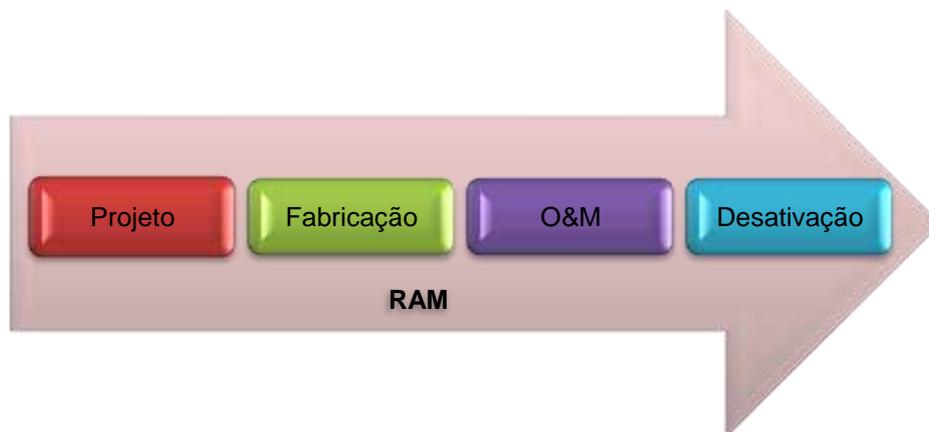


Figura 4: Fases do ciclo de vida do sistema e a aplicação de RAM

A Figura 4 mostra de uma forma simplificada as fases do ciclo de vida de um sistema e a aplicação de RAM, importante em todas as fases. As fases 1 e 2, identificadas por Morais (2005), estão representadas na fase de projeto. As

fases 3, 4 e 5 fazem parte da fase de fabricação, fase 6 é representada pela fase O&M e a fase 7 está representada pela fase de desativação.

É na fase de projeto que ocorrem as principais decisões, as quais determinarão as estratégias da fase de operação e manutenção e o comportamento do sistema, no que diz respeito aos fatores RAM.

As atividades de manutenção são realizadas para garantir uma determinada disponibilidade e um baixo risco de falha. A manutenção preventiva é baseada num plano de manutenção definido pelos objetivos da operacionalidade do sistema, pelas condições de manutibilidade e pelos custos de manutenção. Assim, os fatores RAM determinam a eficácia e o desempenho de um sistema na sua fase de operação.

A devida consideração dos fatores RAM em todas as fases do ciclo de vida do sistema ou produto reduz a incidência de falhas e minimiza as suas consequências. Salienta-se, no entanto, que é principalmente na fase de projeto que devem ser considerados os fatores RAM, de modo a reduzir o risco de falhas e maximizar a vantagem competitiva na produção.

Uma má condução da aplicação RAM na fase de projeto dos produtos, ou sistemas, e decisões precipitadas na gestão da manutenção conduzem a um mau desempenho dos produtos ou sistemas. Segundo Markeset e Kumar (2003), as principais causas de insatisfação dos clientes são frequentemente identificadas pelas falhas inesperadas, levando a custos inesperados. Um maior foco nas necessidades de manutenção podem reduzir consideravelmente os custos na fase de operação e manutenção do ciclo de vida.

No decorrer de um projeto muitas atividades estão interrelacionadas em busca do alcance de objetivos comuns. Os conceitos de projeto aliados com a aplicação otimizada da integração dos fatores RAM podem garantir a obtenção de resultados superiores aos previstos.

2.5 Custos do ciclo de vida de um sistema

A estimativa de custos de cada fase do ciclo de vida (em inglês *Life Cycle Cost* – LCC), proporciona uma previsão dos custos com o sistema e a previsão de retorno financeiro. O custo do ciclo de vida demonstra o impacto do investimento efetuado no sistema. O objetivo da análise LCC é escolher a opção de custo mais eficaz de um conjunto de alternativas, para que o custo de posse a longo prazo seja o mínimo possível (Morais, 2005). É baseada nos efeitos do custo de ciclo de vida que são tomadas as principais decisões.

Para determinar os custos do ciclo de vida, é necessária uma análise dos fatores RAM. Esta análise permite avaliar a disponibilidade de um sistema ao verificar a compatibilidade entre as características de fiabilidade dos equipamentos com a disponibilidade pretendida e com o respetivo plano de manutenção. Ou seja, verifica se o sistema tem capacidade de cumprir com a disponibilidade pretendida. Permite ainda identificar os pontos fracos em todas as fases do ciclo de vida do sistema. Ao realizar esta análise é possível implementar metodologias de melhorias do desempenho do sistema, quer na fase de projeto, quer na fase de exploração e manutenção, alterando a política de manutenção e de operação do sistema. Nesta sequência são definidas exatamente as atividades de manutenção preventiva, preditiva e corretiva.

Na fase de projeto tem-se uma visão antecipada sobre a manutenção e operação, uma previsão dos níveis de disponibilidade e do custo do ciclo de vida. Estas informações permitem que os fornecedores caracterizem quantitativamente o custo do ciclo de vida e mantenham um compromisso de fiabilidade para atingir a disponibilidade pretendida.

Morais (2005), indica que a análise LCC fornece os métodos para a comparação das diferentes alternativas para a realização dos sistemas operativos e estratégias de manutenção a adotar ao longo da sua utilização. Os custos associados ao ciclo de vida são:

C_P - Custos de projeto

C_F - Custos de fabricação

$C_{O\&M}$ - Custos de operação e manutenção

C_D - Custos de desativação

O cálculo do custo do ciclo de vida é feito pela soma dos custos citados anteriormente, dado pela Equação (10):

$$LCC = C_P + C_F + C_{O\&M} + C_D \quad (10)$$

3. Metodologias e Ferramentas

3.1 Introdução

O estudo dos fatores RAM de um sistema depende da aplicação de ferramentas e metodologia. A avaliação da performance de um sistema serve de suporte para a tomada de decisões de gestão. Serão apresentadas algumas ferramentas e metodologias que servirão para modelação e análise no estudo de caso a ser apresentado no capítulo 4.

3.2 Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto (80/20) é um gráfico de barras ou histograma que ordena de forma decrescente os problemas em frequência de ocorrência e identifica os mais importantes. A análise de Pareto é uma abordagem estatística que destaca alguns problemas importantes de entre muitos problemas menos importantes, permitindo priorizar a atenção dada na resolução dos problemas mais importantes. Estes problemas estão frequentemente relacionados entre si e têm múltiplas causas. Nesta análise, os dados de um sistema podem ser agrupados de diferentes formas, fazendo-se uma medição do impacto de mudanças no processo, por exemplo. Uma vantagem do diagrama de Pareto é a redução de dados da amostra para facilitar a análise (Herbert et al, 2010).

O diagrama de Pareto pode ser utilizado na avaliação de equipamentos ou sistemas numa análise de modo de falhas, na definição de projetos de melhoria, na análise de frequência de estados, na análise de tempo de permanência de estados, etc. A Figura 5 mostra um exemplo de um Diagrama de Pareto.

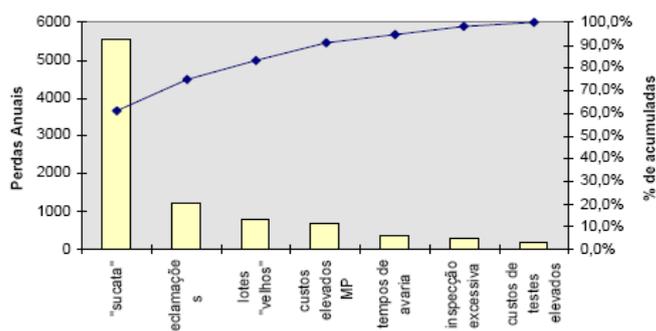


Figura 5: Exemplo de Diagrama de Pareto

3.3 Cadeias de Markov

Os sistemas complexos têm muitos subsistemas, equipamentos e componentes, que podem estar em estado operacional ou em estado de falha. Diferentes combinações de estados dos equipamentos ou componentes de um sistema determinam distintos estados desse sistema, que vão do estado de disponibilidade plena ao estado de falha completa, passando por vários estados de funcionamento degradado do sistema. Estes estados de funcionamento em modo degradado aumentam a probabilidade ou risco de falha do sistema. O estabelecimento de políticas adequadas de manutenção preventiva pode contrariar este processo de degradação e diminuir o risco de falhas do sistema. Para modelar o comportamento de sistemas complexos e determinar indicadores de desempenho relevantes para a tomada de decisão sobre as políticas de operação e manutenção mais adequadas é frequentemente adotada a hipótese markoviana¹. Consequentemente, são utilizados os modelos matemáticos conhecidos por Cadeias de Markov para modelar os processos do comportamento destes sistemas (Nunes, 2005).

Os processos de Markov podem ser utilizados para caracterizar um processo estocástico que descreve o comportamento de uma sequência de eventos aleatórios, mas relacionados. É de grande importância na análise e avaliação da fiabilidade e disponibilidade de sistemas.

A probabilidade de transição entre estados depende do estado imediatamente anterior e não de estados anteriores. O processo esquece o histórico de transições, isto é, é um processo sem memória (Fuqua, 2003). As transições permanecem constantes, sem alterações ao longo do tempo, independente do ponto de partida, caracterizando um processo estacionário.

Para um sistema com um espaço de estados discreto e parâmetro tempo contínuo a Cadeia de Markov pode ser definida pela Matriz $Q = \{q_{ij}\}$, designada por matriz infinitesimal geradora da Cadeia de Markov.

¹A hipótese markoviana consiste em admitir que todos os processos estocásticos que determinam o comportamento dos sistemas são exponencialmente distribuídos.

$$\sum_j q_{ij} = 0 \quad (11)$$

$$Q = \begin{bmatrix} -q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & -q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & -q_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para a distribuição exponencial, q_{ij} é igual à taxa de transição do estado i para o estado j . Os elementos da matriz Q podem ser obtidos do seguinte modo:

$$q_{ij} \begin{cases} \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} \geq 0, & i \neq j \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{p_{ij}(\Delta t) - 1}{\Delta t} \leq 0, & i = j \end{cases} \quad (13)$$

Considerando que o sistema é ergódico, ou seja, os estados são irredutíveis e têm um número finito, o vetor de probabilidades será:

$$\pi^T \cdot Q = 0^T \quad (14)$$

O vetor de probabilidades em regime estacionário é diferenciável nos processos homogêneos de parâmetro contínuo, e tende para 0, sendo definido por:

$$\frac{d\pi(t)}{dt} = \pi(t) \cdot Q \quad (15)$$

As probabilidades de estados também podem ser encontradas pelo sistema de equações diferenciais de Chapman-Kolmogorov:

$$P'(t) = P(t) \cdot Q, \quad t \geq 0 \quad (16)$$

Se $\frac{d\pi(t)}{dt}$ tende para 0, para obter as probabilidades dos estados em regime estacionário, utiliza-se a resolução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \pi^T \cdot Q = 0^T \\ \pi^T \cdot H = 1 \end{cases} \quad (17)$$

Sendo que:

$$H = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

Portanto as probabilidades a cada i e j são:

$$P(X(t) = j | X(0) = i) \rightarrow \pi_j \quad (19)$$

O vetor H é uma matriz coluna unitária, de acordo com (18), com o mesmo número de linhas da matriz Q . Essa equação é necessária para calcular o vetor das probabilidades $\pi(t) = [\pi_0(t), \pi_1(t), \pi_2(t), \dots]$, visto que uma das equações que resulta de (17) é uma combinação linear das restantes equações.

Considerando o caso de um único componente reparável para o qual a taxa de falha e taxa de reparação são constantes, ou seja, com o comportamento caracterizado pela distribuição exponencial, obtém-se o diagrama de transição mostrado na Figura 6.

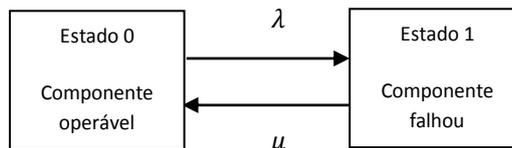


Figura 6: Diagrama de estados de um componente (Adaptado de Billinton e Allan, 1983)

O que define:

$P_0(t)$ = probabilidade do componente estar operacional no tempo t

$P_1(t)$ = probabilidade do componente estar em falha no tempo t

As probabilidades de estados podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t)$$

$$P'_1(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t)$$

A notação matricial é dada por:

$$[P'_0 \quad P'_1] = [P_0(t) \quad P_1(t)] \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$$

Com função de risco constante, a função densidade de falha é dada pela expressão:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Portanto as funções de densidade para o estado de operação e o de falha são:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ e } f(t) = \mu e^{-\mu t}, \text{ respectivamente.}$$

A interpretação correta das taxas de transições entre os estados em relação ao tempo de permanência de cada estado, as falhas e as taxas de reparação é:

$$\text{taxa de transição} = \frac{\text{frequência de transição de um estado}}{\text{tempo dispendido pelo estado}}$$

Sendo assim para λ e μ tem-se:

$$\lambda = \frac{\text{n}^\circ \text{ de falhas no tempo } t}{\text{tempo total de operação}}$$

$$\mu = \frac{\text{n}^\circ \text{ de reparações no tempo } t}{\text{tempo total de reparações}}$$

Então a fiabilidade será dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Em processos estocásticos como são os processos de Markov, os eventos de um sistema não são possíveis de serem previstos mas podem ser especificados por distribuições de probabilidade $\pi_j(t) = P[X_{(t)} = j]$, quer para valores finitos de t , quer quando $t \rightarrow \infty$, obtidas por:

$$P_0 = P_0(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \text{ e } P_1 = P_1(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

3.4 Técnica da frequência e duração

A técnica da frequência e duração é usada para descrever Processos de Markov. Esta técnica é usada em estudos de fiabilidade para calcular a média da frequência e a média do tempo de ocupação de um determinado estado ou grupo de estados. Pode ser aplicada a sistemas reparáveis de grande dimensão tais como sistemas de produção e distribuição de energia, sistemas de produção, redes de telecomunicações, etc.

Voltando novamente ao diagrama de estado da Figura 6:

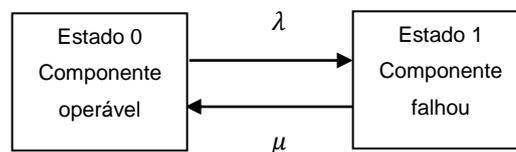


Figura 6: Diagrama de estados de um componente (Adaptado de Billinton e Allan, 1983)

Os tempos médios de transição entre os estados S_0 e S_1 descrevem o comportamento do sistema, tal como se mostra na Figura 7:

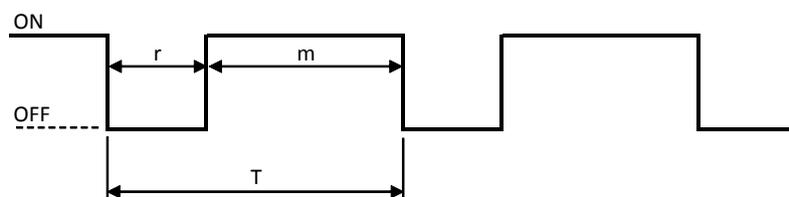


Figura 7: Sistema de componente único (Adaptado de Billinton e Allan, 1983)

Em todos os sistemas reparáveis a probabilidade do componente residir num estado i de um espaço de estado é igual ao tempo médio de residência no estado i , m_i dividido pelo tempo de ciclo médio entre encontros do estado i , T_i ou seja:

$$P_i = \frac{m_i}{T_i} \quad (20)$$

Para o sistema representado na Figura 7, vem:

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{m}{m + r} \text{ e } P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{m + r}$$

Se:

m = tempo médio de operação

r = tempo médio de reparação

T = duração média do ciclo

f = frequência do ciclo médio

Pode ainda estabelecer-se as seguintes relações (Billinton e Allan, 1983):

$$m = \text{MTTF} \quad (21)$$

$$r = \text{MTTR} \quad (22)$$

$$T = m + r = \text{MTBF} = \frac{1}{f} \quad (23)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (24)$$

Através da técnica de frequência e duração pode obter-se os índices de fiabilidade de um sistema de grande dimensão, fazendo uma simplificação do diagrama de espaço de estados do sistema. Nunes, et al (2004), mostra como se pode obter o modelo simplificado de um sistema agrupando os estados com o idêntico comportamento em termos operacionais.

Método da frequência e duração passo a passo

Considere-se como exemplo um sistema de dois componentes, podendo cada uma destes componentes encontrar-se num estado de funcionamento ou num estado de falha (Billinton e Allan, 1983). Deste modo resulta um diagrama de estados com quatro processos e quatro estados distintos como mostra a Figura 8.

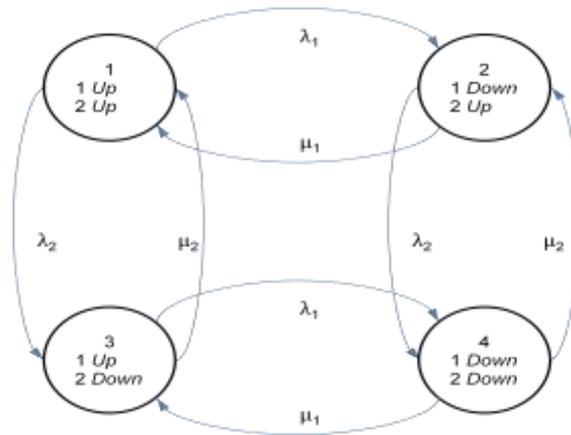


Figura 8: Exemplo de diagrama de estados de um sistema de dois componentes (Adaptado de Billinton e Allan, 1983)

Os componentes 1 e 2 têm taxas de falha e taxas de reparação de $\lambda_1, \mu_1, \lambda_2$ e μ_2 , respectivamente. A matriz Q resultante vem:

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 & - \\ \mu_1 & -(\lambda_2 + \mu_1) & - & \lambda_2 \\ \mu_2 & - & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ - & \mu_2 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Para este exemplo, o método da frequência e duração segue os seguintes passos:

Passo 1: O cálculo da probabilidade individual de cada estado é o primeiro passo no método da frequência e duração. Representa a probabilidade de um sistema se encontrar num determinado estado. Pela resolução do sistema de equações (17) aplicada a este exemplo tem as seguintes expressões para as probabilidades dos estados:

$$P_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad P_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)},$$

$$P_3 = \frac{\mu_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad \text{e} \quad P_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}$$

As probabilidades acumuladas dos estados semelhantes são encontradas pela soma das probabilidades dos estados semelhantes. Neste exemplo existem

dois tipos de estados. Os estados 1 e 2 são estados de funcionamento e os estados 3 e 4 são estados de falha.

$$P_{12} = P_1 + P_2 \quad \text{e} \quad P_{34} = P_3 + P_4$$

Passo 2: O cálculo da frequência individual dos estados é o segundo passo deste método. Representa o número de visitas que o sistema faz a um determinado estado num determinado intervalo de tempo. É dado pelo produto da probabilidade individual do estado em que se encontra, e da soma das taxas de partida do estado em que se encontra:

$$f_i = P_i \left(\sum \text{taxa de partida do estado } i \right) \quad (25)$$

$$f_1 = P_1(\lambda_1 + \lambda_2), \quad f_2 = P_2(\mu_1 + \lambda_2), \quad f_3 = P_3(\lambda_1 + \mu_2) \quad \text{e} \quad f_4 = P_4(\mu_1 + \mu_2)$$

A probabilidade de um sistema de componente único estar no estado de falha ou no estado de funcionamento é a mesma, ou seja tem a mesma frequência. Já um sistema complexo com muitos componentes e muitos estados as frequências dos estados são diferentes (Billinton e Allan, 1983).

Passo 3: Neste passo deve ser calculada a duração média dos estados individuais, que é o tempo de permanência do sistema num determinado estado. A duração média individual é obtida pelas taxas de partida dos estados:

$$m_i = \frac{1}{\sum \text{taxas de partida do estado em que se encontra}} \quad (26)$$

Para o exemplo:

$$m_1 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad m_2 = \frac{1}{\lambda_2 + \mu_1}, \quad m_3 = \frac{1}{\lambda_1 + \mu_2} \quad \text{e} \quad m_4 = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2}$$

Passo 4: O cálculo do tempo individual de ciclo entre os estados é o quarto passo a ser dado. Representa o tempo do processo de transição entre os estados de um sistema. Este cálculo é feito pelo inverso da frequência individual.

$$T_i = \frac{1}{f_i} \quad (27)$$

Para o exemplo:

$$T_1 = \frac{1}{f_1}, \quad T_2 = \frac{1}{f_2}, \quad T_3 = \frac{1}{f_3} \quad \text{e} \quad T_4 = \frac{1}{f_4}$$

Passo 5: Até este passo já se tem respostas parciais aos problemas na avaliação de fiabilidade de um sistema. Finalmente neste passo deve ser feito o cálculo da frequência acumulada dos estados agregados. São somadas as frequências individuais dos estados líderes semelhantes, como por exemplo estados de falha e estados de funcionamento. Desta soma subtraem-se as frequências individuais entre os estados semelhantes, de acordo com (28):

$$f' = \sum f_i \text{ dos estados semelhantes} - \sum f_i \text{ entre os estados semelhantes} \quad (28)$$

De acordo com o exemplo:

$$f'_{34} = f_3 + f_4 - (P_3\lambda_1 + P_4\mu_1)$$

$$f'_{34} = P_3(\lambda_1 + \mu_2) + P_4(\mu_1 + \mu_2) - P_3\lambda_1 - P_4\mu_1$$

$$f'_{34} = P_3\mu_2 + P_4\mu_2$$

$$f'_{34} = (P_3 + P_4)\mu_2$$

Resultando num diagrama simplificado, como mostra a Figura 9:

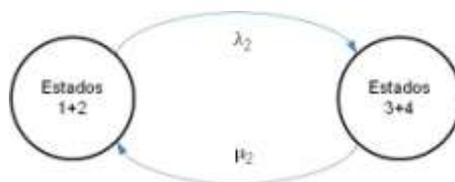


Figura 9: Diagrama simplificado do sistema da Figura (Adaptado de Billinton e Allan, 1983)

Os índices de fiabilidade de sistemas complexos têm os cálculos facilitados quando o diagrama de estados que modela o sistema é simplificado.

Passo 6: Duração média acumulada dos estados é o passo final do método, dada pela equação seguinte:

$$m'_i = \frac{P'_i}{f'_i} \quad (29)$$

Onde:

P'_i = probabilidade acumulada de estar no estado i

f'_i = frequência acumulada do estado i

O cálculo do exemplo será:

$$m'_{12} = \frac{P'_{12}}{f'_{12}} \text{ e } m'_{34} = \frac{P'_{34}}{f'_{34}}$$

3.5 Manutenção Centrada na Fiabilidade

A Manutenção Centrada na Fiabilidade (do inglês *Reliability Centred Maintenance* - RCM) é uma abordagem estruturada para obter a melhor estratégia de manutenção de um equipamento ou sistema. O principal objetivo desta abordagem é otimizar o custo de manutenção, elevar a disponibilidade dos equipamentos para a produção combinando as políticas e custos de manutenção que conduzam a elevados níveis de segurança do pessoal e instalações e à proteção do meio ambiente.

O RCM foi desenvolvido nos anos sessenta pela indústria aeronáutica americana para determinar políticas de manutenção e estabelecer critérios de fiabilidade no decorrer da análise sistemática de falhas aplicando métodos específicos como o *Failure Mode Effects and Analysis* – FMEA (análise de falhas e seus efeitos) nas crescentes inovações surgidas. Posteriormente em meados da década de setenta foi adotado pelo exército americano e em 1980 pela indústria de energia nuclear dos Estados Unidos. Em 1990 passou a ser aplicado em outros setores de atividade.

A abordagem centra-se na fiabilidade dos equipamentos e sistemas. Baseia-se em dados estatísticos de falha e suas consequências para estabelecer programas de manutenção preventiva que garantam a fiabilidade do projeto

dos sistemas. Tem foco nas funções do equipamento ou sistema e não nas funções dos componentes. Qualquer falha é considerada uma perda de função ou perda de qualidade.

Para iniciar a aplicação do RCM deve ser feita a identificação das falhas críticas dos equipamentos de forma estruturada e sistemática (Deshpand e Modak, 2001). Estas falhas podem causar consequências que devem ser também identificadas. Então é necessário verificar se as falhas causam problemas de segurança, no ambiente e verificar se de alguma forma influencia o bom andamento da produção. Estes passos servirão de base para formalizar uma metodologia específica e determinar uma política de manutenção que evite os riscos e reduza os custos originados pela ocorrência de falhas. O RCM segue uma metodologia de análise estruturada do seguinte modo (Deshpande e Modak, 2001):

- 1) Seleção do sistema e recolha de informações – O sistema deve ser analisado e deve-se reunir as informações necessárias;
- 2) Definição do sistema – O sistema deve ser definido e devem ser identificados os pontos críticos de falha;
- 3) Descrição do sistema e diagrama de blocos – A qualidade e objetivos da análise exigem o cumprimento dos seguintes itens:
 - Identificação das descrições funcionais, redundâncias, sistemas de proteção, etc.
 - O diagrama de blocos deve ser completo e incluir claramente o evento de topo;
 - Especificar as saídas e entradas do sistema;
 - Descrever a constituição do sistema, a constituição de equipamentos do sistema, funções e subsistemas do diagrama funcional de blocos.
 - Obter o histórico de falhas de equipamentos dos últimos 2 ou 3 anos;
- 4) Função do sistema e falhas funcionais – Deve-se centrar-se na análise da perda das funções e não nas falhas do equipamento;
- 5) Análise de modos de falha e efeitos - Determinar onde ou em que equipamento pode acontecer uma falha funcional e analisar os possíveis efeitos. Deve-se analisar também os modos de falha, relacionando-os

com as causas, os efeitos e ainda determinando um nível de importância dos mesmos;

- 6) Análise de árvore lógica – Dá-se prioridade e ênfase aos recursos que devem ser alocados em caso de falha;
- 7) Seleção de tarefas – A seleção de tarefas de manutenção preventiva, no método RCM, exige que as mesmas vão de encontro a requisitos de aplicabilidade e teste como definido nos pontos seguintes:
 - Aplicabilidade – A tarefa vai prevenir ou eliminar a falha, permitir identificar a falha ou descobrir uma falha escondida;
 - Efetividade – A tarefa deverá ser a mais efetiva na relação custo - benefício.

A aplicação do RCM requer resposta a 7 questões, de acordo com Moubray (1997):

1. Quais são as funções e padrões de desempenho associados ao ativo no seu contexto operacional atual?
2. De que maneira é que não cumpre as suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre cada falha?
5. Qual é a importância de cada falha?
6. O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha?
7. O que deve ser feito se não pode ser encontrada uma tarefa proativa adequada?

RCM pode ser utilizado em sistemas onde a fiabilidade e disponibilidade são importantes e muitas vezes determinantes para a continuidade do negócio. Neste caso o RCM é importante na obtenção da máxima fiabilidade e de um elevado MTBF. Ter um alto nível de manutibilidade torna-se essencial na obtenção de um baixo MTTR. Isto dá a possibilidade de aumentar significativamente a disponibilidade do sistema.

3.6 Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Produtiva Total (do inglês *Total Productive Maintenance* – TPM) é uma importante estratégia de manutenção que atua na política de

manutenção para maximizar a disponibilidade dos equipamentos e obter índices de qualidade e de produtividade competitivos no mercado.

Surgiu no Japão em 1970 com programas de manutenção preventiva e preditiva. Foi aplicada pela empresa Nippondenso do grupo Toyota como apoio às práticas do *Lean Manufacturing*, para eliminar os desperdícios, eliminar falhas e perda de tempo nos trabalhos de manutenção corretiva.

Esta metodologia está orientada para a melhoria contínua, assim como a Gestão da Qualidade Total. A redução de paragens do equipamento, a eliminação de perdas e a garantia da qualidade dos produtos processados efetivadas por esta metodologia garantem a melhoria da eficiência dos equipamentos e das atividades de manutenção. É possível, então, alcançar ganhos de produtividade, devido a uma maior disponibilidade do equipamento, e reduzir os custos associados à manutenção, que para além de incluir os custos de materiais e peças e os custos de mão de obra, inclui também os custos de perdas de produção originados no decorrer das atividades de manutenção realizadas com o equipamento parado. Tem uma visão abrangente no que diz respeito ao envolvimento total dos operadores, que trabalham ativamente em equipas de produção, projeto, engenharia, etc, consolidando-se no termo manutenção produtiva total. Particularmente, a função manutenção é integrada no processo de produção pela participação dos operadores nas atividades diárias de manutenção, denominando-se este tipo de intervenção de Manutenção Autónoma. Surgiu, assim, a designação Manutenção Produtiva visto que a manutenção autónoma permite que os técnicos de manutenção têm mais tempo para introduzir alterações de melhoria na fiabilidade e manutibilidade dos equipamentos.

O pai do TPM Nakajima (1988), estabeleceu três significados para a palavra “Total”:

- **Total eficácia**, o que significa a manutenção de equipamentos aumenta a produtividade e a qualidade, reduz os custos e aumenta a segurança.
- **Manutenção total**, na fase de projeto o equipamento ou sistema deve ser projetado para sofrer o mínimo de intervenções de manutenção e ter

máxima disponibilidade. Assim como na fase de vida útil deve-se sempre melhorar a fiabilidade e a manutibilidade, estabelecendo programas de manutenção preventiva para minimizar ações de manutenção corretiva.

- **Participação total**, além dos benefícios da manutenção autónoma, deixa de ser uma atividade exclusiva da manutenção, havendo o envolvimento de todos os colaboradores que participam em pequenos grupos de trabalho.

O TPM está baseia-se em 8 pilares, mostrados na Figura 10, cujo fundamento é reduzir os custos do ciclo de vida e maximizar o rendimento operacional. Dependendo do autor, o nome e o número de pilares pode variar ligeiramente, no entanto o modelo geralmente aceite é o modelo com oito pilares de Nakajima.

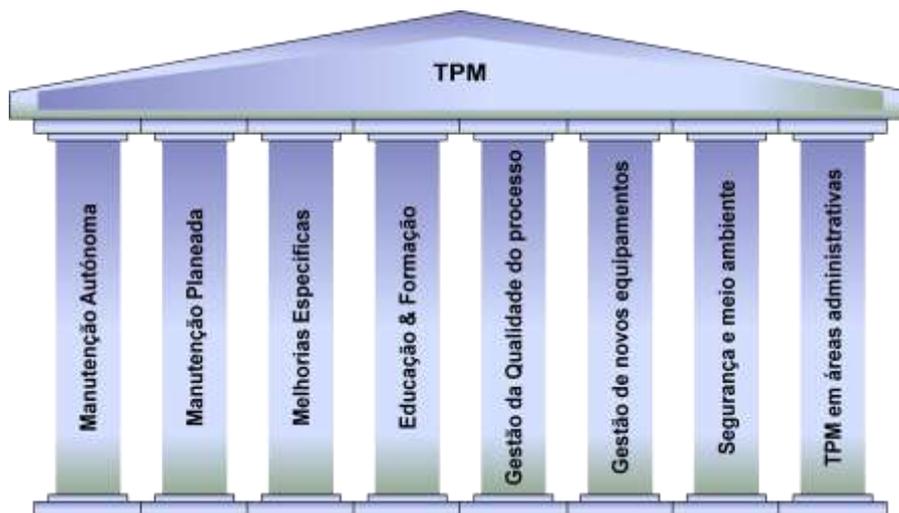


Figura 10: Pilares do TPM

Manutenção autónoma – Consiste na melhoria da eficiência dos equipamentos, desenvolvendo a capacidade dos operadores para a execução de pequenas reparações e inspeções, mantendo o processo de acordo com padrões estabelecidos, antecipando-se aos problemas potenciais. Os objetivos da manutenção autónoma são:

- Prevenir a deterioração do equipamento através de uma operação correta e de inspeções diárias;

- Repor o equipamento para o seu estado ideal através da restauração e gestão adequada;
- Estabelecer as condições básicas necessárias para manter o equipamento bem conservado.

Com a manutenção autónoma, os operadores passam a executar algumas tarefas básicas de manutenção que até ali eram apenas da responsabilidade dos técnicos de manutenção. Por outro lado, o pessoal de manutenção tem também a responsabilidade de dar formação aos operadores.

A manutenção autónoma é um pilar fundamental do TPM pois a consolidação dos restantes pilares é influenciada pela realização das suas atividades.

A manutenção autónoma tem dois objetivos, o de impulsionar o desenvolvimento e conhecimento dos operadores de equipamentos e o de estabelecer uma implantação fabril ordenada e que facilita a deteção de problemas nos equipamentos. A sua implementação envolve o uso da metodologia 5S.

Metodologia 5S

O 5S é uma metodologia para organização e limpeza do espaço de trabalho que possibilita uma melhor gestão visual e a identificação de situações anormais, que segue 5 princípios:

- “Seiri” – Seleção ou triagem
- “Seiton” – Organização ou arrumação
- “Seiso” – Limpeza
- “Seiketsu” – Padronização
- “Shitsuke” – Autodisciplina

A partir dos princípios do 5S, a implementação da manutenção autónoma deve seguir 7 passos:

1. Limpeza e inspeção inicial
2. Eliminar fontes de problemas ou sujidade e áreas de difícil acesso
3. Definir standards de limpeza, lubrificação e inspeção

4. Realizar formações sobre inspeções gerais
5. Verificar os procedimentos de inspeção
6. Gestão e controlo do posto de trabalho.
7. Melhoria contínua

Manutenção planeada - O objetivo da manutenção planeada é estabelecer e manter os equipamentos e os processos em ótimas condições. Ao criar uma rotina de manutenção preventiva, para todos os equipamentos e ferramentas, é possível evitar perdas e falhas de equipamentos.

Melhorias específicas do equipamento e do processo - Consiste em acrescentar melhorias para maximizar a eficiência dos equipamentos ou sistemas, eliminando desperdícios e perdas de produção. As melhorias visam zero perdas que reflete zero falhas, zero defeitos, zero desperdícios na operação dos equipamentos.

Shirose (1996), classifica as perdas em 3 grandes grupos:

- Perdas associadas ao equipamento – São consideradas as perdas por paragem devido a falhas, perdas de set-up, perdas devido a pequenas paragens, perdas devido a redução de velocidade, perdas devido a defeitos e perdas de start-up. Para identificar os desperdícios associados ao equipamento utiliza-se o indicador *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), que permite quantificar as perdas e acompanhar o processo de melhoria. Outras ferramentas como o Diagrama de Pareto, os cinco porquês, diagrama de causa-efeito; análise P-M; árvore de falhas (FTA) e análise de modos de falha e efeitos (FMEA) também são utilizadas para analisar as perdas de produtividade.
- Perdas associadas à mão de obra – As perdas relativas à lubrificação e verificações, espera de materiais, espera de instruções, espera pela confirmação da qualidade estão associadas à mão de obra.
- Perdas associadas ao material – São as perdas de material, perdas de energia, perda de materiais consumíveis.

Educação e formação – Neste pilar é destacada a importância da aprendizagem contínua e reciclagem da formação dos funcionários, para acompanhar o processo evolutivo do TPM. O objetivo do pilar educação e formação é manter a qualificação dos operadores e dar-lhes a capacidade de executar de modo eficaz as práticas e metodologias estabelecidas no âmbito dos outros pilares do TPM. É neste pilar que são estabelecidos os sistemas humanos e as estruturas para executar o TPM. Sendo assim, é possivelmente o pilar mais crítico de todos os pilares para manter o programa TPM no longo prazo.

Processo de gestão da qualidade - A gestão da qualidade do processo visa estabelecer as condições para os "zero defeitos". Isto implica em seguir as normas especificadas para manter as condições do processo, inspecionar e monitorizar as condições para eliminar a variação, e executar ações preventivas da ocorrência de defeitos ou falhas no equipamento ou processo.

Gestão de novos equipamentos - Este pilar consiste no planeamento de melhorias em projeto de equipamentos existentes no que diz respeito a fiabilidade, durabilidade, economia, operacionalidade, segurança e flexibilidade. A gestão de novos equipamentos considera que estes projetos serão desenvolvidos para serem facilmente produzidos tanto em equipamentos novos como em equipamentos existentes.

TPM em áreas administrativas – Este pilar está relacionado com a análise dos processos e procedimentos nas áreas administrativas a fim de identificar e eliminar perdas. A implementação do TPM em áreas administrativas visa aumentar a produtividade e eficiência nas funções administrativas.

Segurança e meio ambiente - Este pilar estabelece que deve ser mantida a segurança no local de trabalho e que deve-se evitar que o meio ambiente seja afetado pelos processos utilizados pela organização. O objetivo a ser alcançado é de zero acidentes; zero danos na saúde e zero incêndios.

O processo de implementação do TPM passa por 4 fases:

Fase 1: Preparação - Nesta fase deve ser criado um ambiente favorável ao desenvolvimento do TPM para vencer a resistência inicial à mudança. Também é nesta fase que deve ser preparado um plano para a introdução do TPM.

Fase 2: Introdução do TPM - Na fase 2 o plano de introdução é colocado em prática com o envolvimento de todos os operadores nas atividades de implementação do TPM.

Fase 3: Implementação - Esta fase foca-se na melhoria da eficiência dos equipamentos e na implementação dos pilares do TPM.

Fase 4: Consolidação - A fase final tem o objetivo de consolidar e estabilizar o programa do TPM.

3.7 O indicador de Eficiência Global do Equipamento

O indicador de Eficiência Global do Equipamento (do inglês *Overall Equipment Effectiveness* – OEE) é utilizado na implementação do TPM. É uma ferramenta utilizada na medição e monitorização para o controlo do processo de melhoria do equipamento. Tem como objetivo reduzir perdas de disponibilidade, perdas por defeito e perda de velocidade de funcionamento. Como mostra a Figura 11, quanto maiores forem as perdas verificadas maior será a diferença entre o tempo disponível para produção e o tempo efetivo de produção.

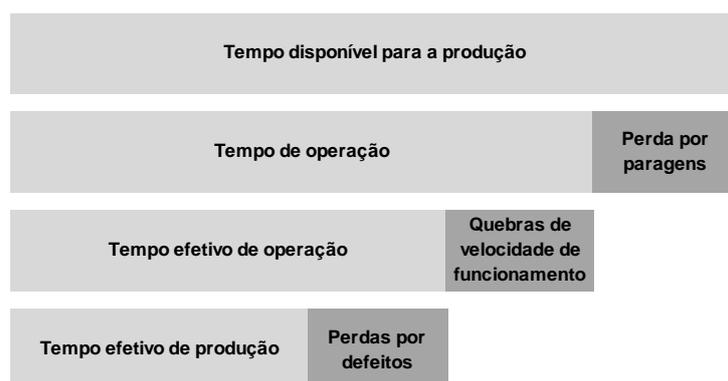


Figura 11: Perdas contabilizadas pelo OEE

O OEE contabiliza perdas associadas aos equipamentos de seis tipos (Chan, et al., 2005):

1 - **Perdas por paragem:** São as perdas de tempo devido a falha dos equipamentos levando a perdas de produção devido à indisponibilidade dos equipamentos.

2 - **Perdas de Set-up e de ajustamentos:** Estas são as perdas de tempo para iniciar a produção de um novo produto. A mudança para a nova produção acarreta perdas de tempo. Este tempo perdido é contado a partir do final da produção do produto anterior até ao início de produção satisfatória do novo produto.

3 - **Micro-paragens e operação em vazio:** Micro-paragens ocorrem quando a produção é interrompida por uma anomalia ou erro temporário. Operação em vazio ocorre quando o equipamento está a operar em vazio por falta de material ou do operador.

4 - **Redução de velocidade:** Estas perdas ocorrem quando o equipamento está a funcionar a uma velocidade reduzida.

5 - **Defeitos e retrabalhos:** As perdas por defeito e retrabalho ocorrem quando há produção defeituosa e deve ser feito um retrabalho para a recuperação da produção normal.

6 - **Perdas no arranque de produção:** Nos arranques após intervenções, paralisações, após férias ou paragens para o almoço há uma perda de tempo e volume de produção. Estas perdas devem ser contabilizadas na percentagem de disponibilidade.

A medida do OEE é em percentagem e demonstra o produto da disponibilidade, performance operacional e da qualidade dos produtos no período planeado de operação, como mostra a Equação (30):

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade} \quad (30)$$

Disponibilidade - Contabiliza os tempos de paragem do equipamento: os tempos de paragem devido a falhas e tempos de *setup*, como mostra a Equação (31):

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{tempo disponível para produção} - \text{tempo de paragem}}{\text{tempo disponível para produção}} \quad (31)$$

Performance - Contabiliza as perdas de velocidade de funcionamento: micro-paragens e redução de velocidade de operação, de acordo com as Equação (32) ou (33):

$$\text{Performance} = \frac{\text{tempo de ciclo ideal} \times \text{quantidade de unidades produzidas}}{\text{tempo de operação}} \quad (32)$$

$$\text{Performance} = \frac{\text{quantidade de unidades produzidas}}{\text{quantidade teoricamente produzida à velocidade máxima}} \quad (33)$$

Qualidade – São consideradas as perdas por unidades retrabalhadas, peças não recuperáveis, perdas de unidades no início da produção (*startup*), de acordo com a Equação (34):

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{n}^\circ \text{ unidades produzidas} - \text{n}^\circ \text{ de unidades defeituosas}}{\text{número de unidades produzidas}} \quad (34)$$

4. Estudo de caso

4.1 Introdução

Uma empresa que gere um sistema eólico de produção de energia, situado em Portugal, disponibilizou dados históricos dos anos de 2009 e 2010 dos seus aerogeradores. No desenvolvimento do estudo de caso foi feita a recolha, análise e posterior tratamento dos dados do histórico de falhas de geradores eólicos, com vista a um bom conhecimento do seu estado atual e passado, para fundamentar a importância e a pertinência da realização do trabalho. Os fatores RAM dos aerogeradores foram analisados a partir de técnicas de análise de fiabilidade e de vários indicadores de avaliação da sua performance. Os resultados do estudo efetuado fundamentaram indicações de melhoria com vista a uma melhor performance dos aerogeradores.

4.2 Enquadramento e objetivos

Os parques eólicos estão hoje em dia equipados com tecnologia de ponta que permitem recolher e armazenar em bases de dados enormes quantidades de dados. O tratamento e análise destes dados podem suportar a tomada de melhores decisões tanto operacionais como estratégicas. Muitas das decisões operacionais são tomadas automaticamente pelo sistema de controlo do aerogerador/parque, mas muitas outras decisões, principalmente de carácter estratégico, poderão ser tomadas de uma forma mais fundamentada a partir de uma análise científica profunda dos dados disponibilizados automaticamente pelo sistema. Estes dados são exclusivamente de natureza operacional e com eles pretende-se descrever o comportamento funcional do aerogerador ao longo do tempo. Mais concretamente, pretende-se construir um modelo do comportamento de um aerogerador concreto, recorrendo a técnicas adequadas de análise e tratamento de dados, e obter indicadores de desempenho relacionados com os fatores RAM. A partir destes indicadores poderão ser propostas ações de melhoria do desempenho operacional do aerogerador.

4.3 Descrição do sistema

O aerogerador estudado é um conversor de energia eólica com três pás de rotor, controlo de *pitch* ativo e velocidade de operação variável. Tem uma potência nominal de 2000 kW, 82 m de diâmetro do rotor e 108 m de altura. O vento predominante nos diferentes sítios é utilizado para a eficiente geração de energia elétrica. Na Figura 12 pode ver-se um exemplo de aerogerador de um sistema eólico.



Figura 12: Exemplo de sistema eólico (PortalMidia, 2009)

As principais partes ou subsistemas do aerogerador em questão são o gerador, o rotor e o sistema de ligação à rede.

Este aerogerador tem um grande número de condições de funcionamento e avalia o estado atual dos componentes individuais para o controlo do sistema. Uma variedade de sensores, tais como sensores de temperatura, transmissores de ângulo, sensores de velocidade, etc, medem esses dados e o estado é monitorizado pelo sistema de controlo. Alguns sensores, por exemplo, para determinar a direção do vento, fornecem continuamente os dados que afetam a operação do conversor de energia eólica. Outros verificam se o conversor de energia eólica está em estado de operação aceitável.

Os 34 aerogeradores do parque eólico são classificados em dois tipos relativamente à potência, 28 de um tipo e 6 de outro tipo. Este estudo incide sobre os 28 aerogeradores do mesmo tipo (2 MW) existentes no parque. São também estes aerogeradores os que têm uma tecnologia mais avançada e atual.

4.4 Análise e tratamento dos dados

Os dados tratados neste estudo foram disponibilizados em vários ficheiros Microsoft Excel por uma empresa que gere e explora um parque eólico de produção de energia elétrica. Cada ficheiro continha os registos dos estados dos 34 aerogeradores do parque, ocorridos durante um mês. Foram disponibilizados dados de todos os meses do ano de 2009 e 2010. Cada registo contém a identificação do aerogerador, o estado, hora de ocorrência da mudança de estado e a velocidade do vento como se pode ver na Tabela 2.

Tabela 2: Estrutura de registo dos dados

Data (dd/mm/aa)	Hora	Minuto	Segundo	Nº do Aerogerador	Estado	Subestado	Velocidade do vento (m/s)	Service	FaultMsg
02-01-2009	5	28	14	18	0	0	4,2	Falso	Falso
02-01-2009	5	29	18	16	0	0	2,7	Falso	Falso
02-01-2009	8	16	16	19	50	14	7,4	Falso	Verdadeiro
02-01-2009	9	9	31	22	25	134	6,3	Falso	Falso
02-01-2009	9	9	56	19	8	0	6,7	Verdadeiro	Falso

Inicialmente os dados foram observados com o intuito de detetar os estados que indicavam uma paragem da máquina por falha e, conseqüentemente, uma ação de manutenção. No entanto notou-se que os aerogeradores podem parar por falta de vento, por tormenta, por ter sido programada uma manutenção preventiva ou até mesmo por uma falta de leitura dos sensores do aerogerador que indicam dados de vento, temperatura, humidade, entre outros. Conclui-se que a sinalização de uma falha ou paragem de produção está relacionada não apenas com problemas técnicos mas também com problemas externos ou fatores naturais. Contudo a informação disponibilizada restringe-se aos dados acima referidos, com apoio do manual de instruções do aerogerador, pelo que o estudo efetuado consiste numa análise estatística destes dados.

Os dados obtidos são, especificamente, os registos dos estados em que se encontra cada aerogerador do parque eólico em estudo, a cada segundo, 24 horas por dia. São mais de duas centenas os estados que caracterizam o comportamento dos componentes do aerogerador ao longo do tempo. Estes estados podem indicar que: o aerogerador está em operação plena, que não há vento com velocidade mínima necessária para a produção, que o aerogerador está sob atividades de manutenção, que há gelo ou humidade numa pá, etc.

Ou seja, são registos relacionados a tudo que ocorre com os aerogeradores a cada momento. A partir dos dados identificaram-se 69 estados (ver Tabela 3).

Tabela 3: Lista de estados do aerogerador

Estado	Descrição do estado	Estado	Descrição do estado
S₁	Turbina em operação	S₃₆	Alta temperatura de gerador
S₂	Turbina parada	S₃₇	Monitorização de intervalo de ar
S₃	Falta de vento	S₃₈	Monitorização de torque
S₄	Tormenta	S₃₉	Temperatura do rolamento
S₅	Manutenção	S₄₀	Erro de excitação
S₆	Aquecimento de gerador	S₄₁	Proteção de Disjuntor desarmado
S₇	Paragem de emergência acionada	S₄₂	Semiconductor fusível queimado
S₈	Rotor e freio manual ativado	S₄₃	Erro de medição de temperatura
S₉	Rotor bloqueado	S₄₄	Deteção de fumaça
S₁₀	Deteção de gelo	S₄₅	<i>No turbine-id</i>
S₁₁	Umidade na turbina	S₄₆	<i>Inverter bus error</i>
S₁₂	Teste de velocidade excessiva	S₄₇	Sem dados do controlo de potência
S₁₃	Teste do sistema de segurança	S₄₈	Falha no controlo de inversor
S₁₄	Medição de vento defeituosa	S₄₉	Processador reiniciado
S₁₅	Cabo torcido	S₅₀	<i>Watchdog reiniciado</i>
S₁₆	Falha no controlo de giro	S₅₁	Turbina reiniciada
S₁₇	Falha de inversão de giro	S₅₂	Aviso de mensagem fora do tempo
S₁₈	Anemometer interface	S₅₃	Controlo remoto PC
S₁₉	Oscilação da torre	S₅₄	Erro de controlo do bus da turbina
S₂₀	Excesso de velocidade do rotor	S₅₅	Erro de controlo de alimentação do bus
S₂₁	<i>Rotor overspeed switch</i>	S₅₆	<i>Data bus error blade contr. CAN2</i>
S₂₂	Erro no controlo de <i>pitch</i>	S₅₇	Erro de controlo do bus da turbina
S₂₃	Falha do circuito principal de segurança	S₅₈	<i>No data from I/O-Board control cabinet</i>
S₂₄	Falha de teste de capacitor	S₅₉	<i>No data from</i>
S₂₅	Falha de sistema de segurança	S₆₀	Erro de dados do bus no controlo da pá
S₂₆	Erro no sensor de velocidade	S₆₁	<i>Unknown node-ID</i>
S₂₇	Falha no controlo de carga da pá	S₆₂	Erro CAN1- interrupção
S₂₈	Sensor de monitoramento	S₆₃	Mau funcionamento do bus-IIC
S₂₉	Falha de rede	S₆₄	Erro de processador +12V
S₃₀	Repartição de corrente	S₆₅	Erro de processador -12V
S₃₁	Falha de alimentação	S₆₆	Erro de hardware de abastecimento
S₃₂	<i>Overcurrent inverter</i>	S₆₇	<i>Error +10V ref. sensor system</i>
S₃₃	Falha de retificador	S₆₈	<i>Error supply IGBT-driver</i>
S₃₄	Alta temperatura	S₆₉	<i>Potential difference sensor system</i>
S₃₅	Sensor acústico		

Para cada um destes estados avaliou-se dois indicadores básicos: a frequência de visitas ao estado e o seu tempo total de permanência por ano. Nas Tabelas

4 e 5 apresentam-se os resultados obtidos por ordem decrescente dos seus valores.

Tabela 4: Frequência dos estados por ano

Estado	Frequência (Nº visitas/ano)	Estado	Frequência (Nº visitas/ano)
S ₁	60.890,0	S ₂₈	25,5
S ₃	15.718,5	S ₁₄	20,5
S ₅₃	1.593,5	S ₄₁	17
S ₂₉	1.436,0	S ₄₃	12
S ₅	1.324,5	S ₈	10
S ₁₅	991	S ₂₃	10
S ₃₁	798,5	S ₅₉	10
S ₅₁	733,5	S ₄₈	9,5
S ₂₇	442	S ₁₆	8,5
S ₁₇	419	S ₃₇	8,5
S ₂₂	386,5	S ₃₈	8,5
S ₄	318,5	S ₆₆	4,5
S ₂	291,5	S ₄₄	4
S ₆₈	272	S ₄₅	3,5
S ₁₀	238,5	S ₅₀	3,5
S ₅₇	194,5	S ₃₅	2,5
S ₅₂	193	S ₃₉	2,5
S ₁₁	171	S ₆₁	2,5
S ₁₈	157	S ₆₄	2,5
S ₃₂	129	S ₆₇	2,5
S ₃₃	118,5	S ₂₅	2
S ₆	111,5	S ₄₂	2
S ₆₀	94	S ₅₈	1,5
S ₄₆	89	S ₆₉	1,5
S ₅₄	82	S ₇	1
S ₁₃	80,5	S ₁₂	1
S ₃₀	78,5	S ₂₁	1
S ₄₉	66,5	S ₂₄	1
S ₃₄	54	S ₂₀	0,5
S ₅₅	47,5	S ₃₆	0,5
S ₂₆	44	S ₅₆	0,5
S ₄₀	43	S ₆₂	0,5
S ₄₇	38	S ₆₃	0,5
S ₉	37	S ₆₅	0,5
S ₁₉	29		

Tabela 5: Tempo de permanência (min/ano)

Estado	Tempo de permanência	Estado	Tempo de permanência
S ₁	12.588.089,5	S ₄₇	458,5
S ₃	1.076.632,5	S ₃₄	398
S ₅	289.651,0	S ₃₅	228
S ₅₃	151.656,0	S ₃₃	206
S ₁₀	88.575,0	S ₂₆	138
S ₁₅	37.157,5	S ₆₄	110,5
S ₂₂	27.886,5	S ₃₇	81
S ₂₇	19.833,5	S ₃₀	62
S ₁₈	12.407,0	S ₄₈	57,5
S ₄₁	7.912,0	S ₃₈	47,5
S ₁₇	7.099,0	S ₅₁	43,5
S ₂₈	5.988,5	S ₆₉	43,5
S ₆	5.350,5	S ₁₁	30
S ₆₈	4.987,0	S ₄₅	29,5
S ₅₂	4.612,0	S ₁₃	23,5
S ₄	3.962,0	S ₃₉	16
S ₆₀	3.874,0	S ₅₅	11
S ₃₁	3.611,5	S ₂₁	10
S ₂	3.357,5	S ₄₉	9
S ₅₇	2.910,0	S ₅₀	8,5
S ₁₉	2.727,5	S ₆₇	7,5
S ₁₆	2.595,5	S ₁₂	6
S ₄₀	2.399,0	S ₂₃	3,5
S ₄₃	2.136,5	S ₆₅	3,5
S ₄₄	2.080,5	S ₈	2
S ₄₆	1.961,5	S ₅₉	1,5
S ₅₄	1.530,5	S ₇	0,5
S ₂₄	1.437,5	S ₃₆	0,5
S ₆₆	1.253,5	S ₅₈	0,5
S ₂₅	1.045,0	S ₆₁	0,5
S ₃₂	1.022,0	S ₂₀	0
S ₄₂	1.006,5	S ₅₆	0
S ₂₉	832,5	S ₆₂	0
S ₉	757	S ₆₃	0
S ₁₄	484,5		

Observou-se que muitos estados ocorreram muito poucas vezes durante um ano. Além da frequência, o tempo anual de permanência em cada estado também caracteriza o desempenho produtivo dos aerogeradores, e seus respectivos gráficos são apresentados no anexo A.

Ao fazer-se uma análise de Pareto, decidiu-se centrar o estudo nos 11 estados mais visitados e nos 11 estados com maior tempo anual de permanência. Informações dadas pela administração do parque eólico relativamente à importância dos estados S_{22} e S_{27} justificaram a necessidade da sua inclusão no espaço de estados, E , considerado neste estudo. As Figuras 13 a) e 13 b) mostram os 11 estados de maior frequência e os 11 estados com maior tempo anual de permanência, respetivamente.

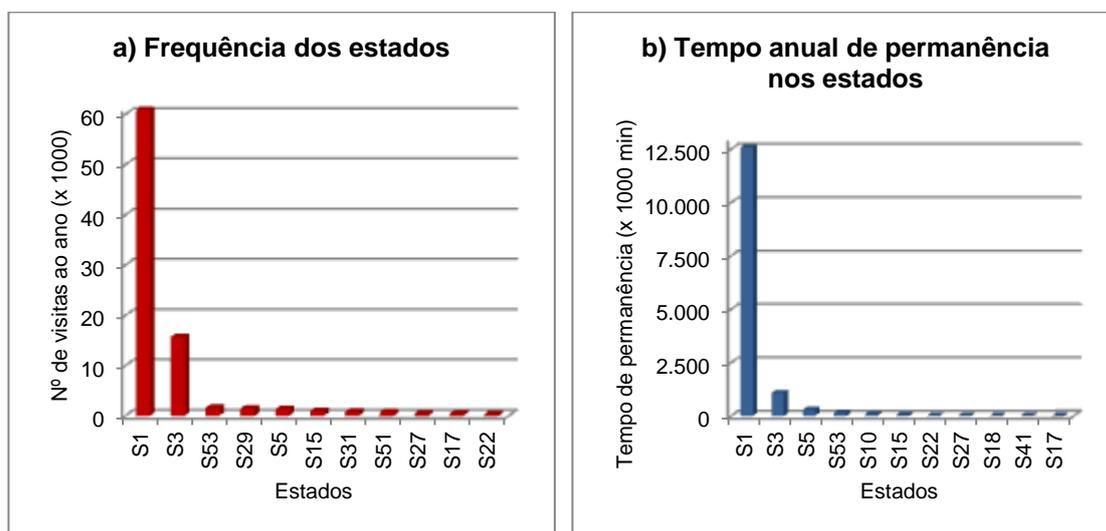


Figura 13: a) Gráfico dos 11 estados mais frequentes ao ano; b) Gráfico dos 11 estados mais permanentes ao ano

4.5 Identificação e caracterização do espaço de estados

Da união da lista dos 11 estados mais frequentes com a lista dos 11 estados com maior tempo anual de permanência, resulta um conjunto de 14 estados, 8 dos quais são comuns às duas listas. A Tabela 6 lista os 14 estados que constituem, daqui em diante, o espaço de estados, E . No anexo B mostra-se uma descrição detalhada de cada um destes estados.

Tabela 6: Estados que constituem o espaço de estados

Estado	Descrição
S₁	Turbina em operação
S₃	Falta de vento
S₅	Manutenção
S₁₀	Deteção de gelo
S₁₅	Cabo torcido
S₁₇	Falha na inversão de giro
S₁₈	<i>Anemometer interface</i>
S₂₂	Erro no controlo do <i>pitch</i>
S₂₇	Falha no controlo de carga na pá
S₂₉	Falha de rede
S₃₁	Falha de alimentação
S₄₁	Proteção disjuntor desarmado
S₅₁	Trubina reiniciada
S₅₃	Controlo remoto PC

Com base na leitura dos dados registados e da consulta do manual de instruções do aerogerador, atribuiu-se a classificação apresentada na Tabela 7 a cada estado de E.

Tabela 7: Principais estados do aerogerador

Estado	Classificação do estado
S₁	Disponibilidade plena
S₃	Disponibilidade plena
S₅	Indisponível
S₁₀	Disponibilidade “parcial”
S₁₅	Indisponível
S₁₇	Indisponível
S₁₈	Disponibilidade “parcial”
S₂₂	Indisponível
S₂₇	Disponibilidade “parcial”
S₂₉	Disponibilidade plena
S₃₁	Indisponível
S₄₁	Indisponível
S₅₁	Indisponível
S₅₃	Disponibilidade “parcial”

Nesta classificação, considera-se o estado $S_i \in E$, como um estado de disponibilidade operacional plena quando o aerogerador não apresenta

qualquer perda de disponibilidade operacional nesse estado, embora possa estar sem produzir por falhas exógenas ao aerogerador (como por exemplo por falta de vento ou por problemas na rede de distribuição). O estado $S_i \in E$ apresenta uma disponibilidade operacional “parcial” quando o aerogerador nesse estado não está nem em funcionamento pleno nem no estado de indisponível (funciona ou pode funcionar em modo degradado com perda de desempenho). Por último, o estado $S_i \in E$ é tido como um estado de indisponibilidade operacional se o aerogerador se encontra indisponível em S_i (parado a aguardar manutenção corretiva, parado em manutenção preventiva, etc.). Refira-se que esta classificação baseia-se na descrição detalhada dos estados de E apresentada no anexo B.

4.6 Modelação do sistema

Estabelecido o espaço de estado do sistema (aerogerador), procedeu-se à análise dos dados no sentido de caracterizar os tempos médios dos processos de transição entre todos os estados de E .

Na Figura 14 apresenta-se o diagrama de estados do aerogerador considerado neste estudo. O processo de transição do estado i para o estado j ($i, j \in E$ e $i \neq j$) é representado por p_{i-j} . Por exemplo o processo de transição do estado 29 para o estado 0 é representado por p_{29-0} .

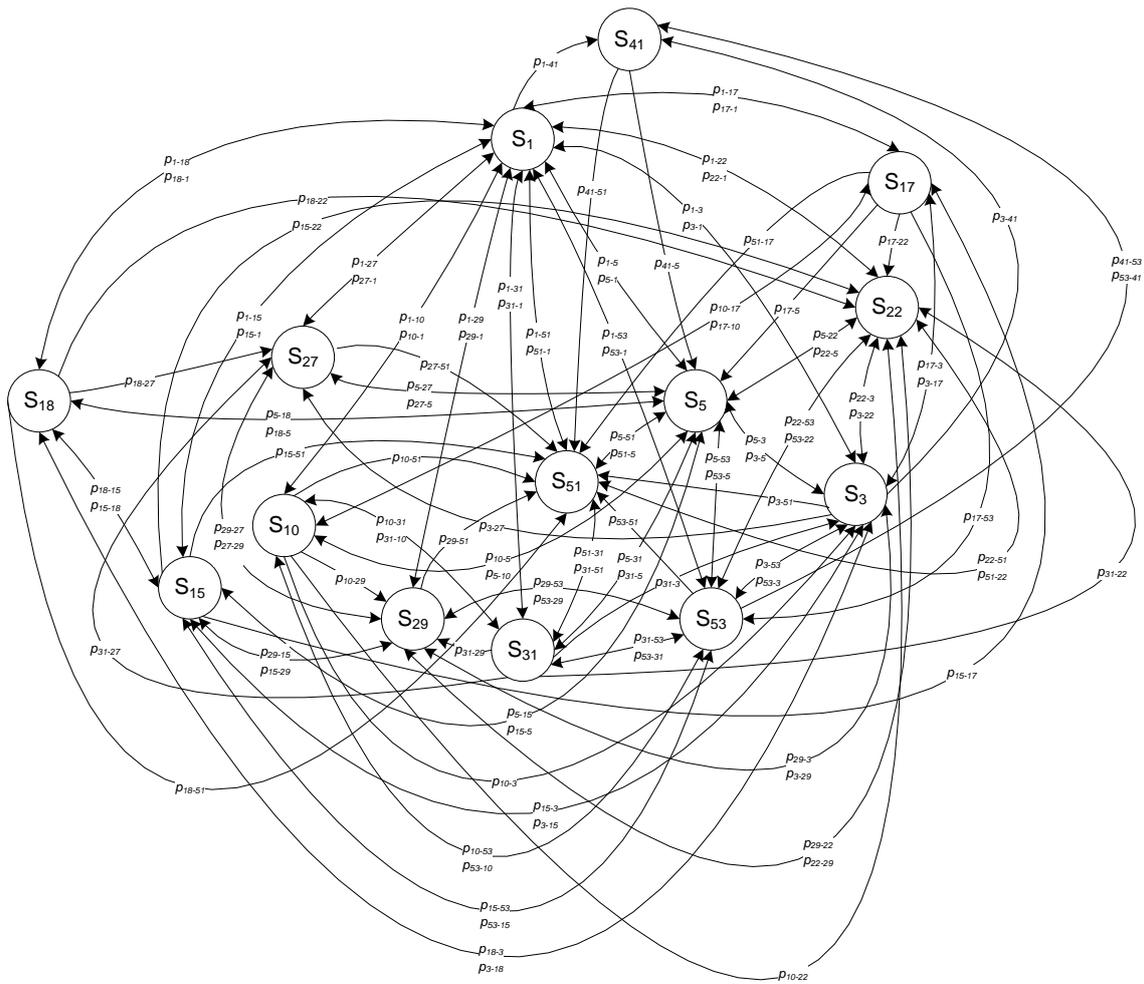


Figura 14: Diagrama de estados de aerogerador

Seja M_k um dos 28 aerogeradores considerados neste estudo e t_{ijk} , o tempo médio de permanência do aerogerador k (com $k=1, 2, 3, \dots, 28$) no estado S_i até mudar para o estado S_j ($i, j \in E$ e $i \neq j$). Para cada M_k calculou-se todos os t_{ijk} através de uma Macro em Excel (ver anexo C). Na Tabela 8 mostram-se os resultados obtidos para o aerogerador 1 (M_1).

Tabela 8: Tempo médio dos processos de transição do aerogerador 1 (minutos)

	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃
S ₁		815	1.086	567	1.067	766	52	341	864	941	241	790	3.529	1.233
S ₃	56		19		41				3	80			19	46
S ₅	164	78												947
S ₁₀	549	360	1.996								370			
S ₁₅	38	38												
S ₁₇	0													
S ₂₂	1		3										63	
S ₂₇	0	0	338						0	0			26	
S ₂₉	0	0								1			170	
S ₃₁	1	1							0		0		2	5
S ₄₁	2	1		1									148	5
S ₅₁			622											
S ₅₃	0							0		0	0			
S ₅₃	25	560	1.946										617	

Fazendo o somatório dos tempos médios t_{iju} para os 28 aerogeradores obtiveram-se os resultados da Tabela 9.

Tabela 9: Tempo total dos processos de transição (minutos)

	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃
S ₁		17.994	24.902	29.125	28.266	27.983	13.294	17.251	14.484	24.981	20.200	26.575	41.288	33.695
S ₃	1.845		2.338	0	1.408	69	167	92	7	1.912		96	1.206	1.898
S ₅	4.689	5.116		59	45		5.822	302	2.547		389		520	33.552
S ₁₀	10.131	16.206	25.261			43		743		3.268	674		9.832	408
S ₁₅	729	1.059	86			7	2	3		91	0		68	5
S ₁₇	18	27	2.490	1				1					524	5
S ₂₂	17	1	4.870		0			4	6				5.415	
S ₂₇	9	3	8.416	0	0	0			0	4			3.083	178
S ₂₉	4	0	4.817				0			263	0		5.796	
S ₃₁	13	11	0	0	1			1	4		0	0	186	137
S ₄₁	20	11	596	2	0			7	3	11			792	2.110
S ₅₁			7.302										1.458	33
S ₅₃	2	0	1		0	0	0	0		0	1			0
S ₅₃	1.255	806	12.548	12	73			14.340		533	1.577	11	17.745	

Dividindo os tempos totais dos processos de transição apresentados na Tabela 9 pelos 28 aerogeradores calculam-se os tempos médios despendidos em cada estado por um aerogerador (Tabela 10).

Tabela 10: Tempos médios dos processos de transição (minutos/aerogerador)

	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃
S ₁		643	889	1.040	1.009	999	475	616	517	892	721	949	1.475	1.203
S ₃	66		83	0	50	2	6	3	0	68		3	43	68
S ₅	167	183		2	2		208	11	91		14		19	1.198
S ₁₀	362	579	902			2		27		117	24		351	15
S ₁₅	26	38	3			0	0	0		3	0		2	0
S ₁₇	1	1	89	0				0					19	0
S ₂₂	1	0	174		0			0	0				193	
S ₂₇	0	0	301	0	0	0			0	0			110	6
S ₂₉	0	0	172				0			9	0		207	
S ₃₁	0	0	0	0	0			0	0		0	0	7	5
S ₄₁	1	0	21	0	0			0	0	0			28	75
S ₅₁			261										52	1
S ₅₃	0	0	0		0	0	0	0		0	0			0
S ₅₃	45	29	448	0	3			512		19	56	0	634	

Os espaços em branco na Tabela 10 correspondem a transições inexistentes. As transições com valores nulos representam transições cuja duração é inferior a um décimo de minuto.

Pela análise dos dados desta Tabela verifica-se que, de um modo geral, os tempos médios dos processos concorrentes em qualquer dos estados do modelo apresentam tempos médios de ordem de grandeza muito díspar. Nestas circunstâncias, de acordo com Nunes et. al. (2002), a adoção da hipótese markoviana (mesmo que os processos sejam modelados por distribuições não exponenciais) não introduz erros significativos nos valores das medidas (ou indicadores) de desempenho em regime estacionário. Justifica-se deste modo a adoção da hipótese markoviana neste estudo, dada as simplificações de análise que proporciona. Assim, as transições entre os estados do sistema ocorrem com taxas constantes. Para $i \neq j$ a taxa de transição, q_{ij} é dada por:

$$q_{ij} = \frac{1}{\text{tempo médio do processo de transição do estado } i \text{ para } j}$$

Para $i = j$, tem-se:

$$q_{ii} = - \sum_{j \neq i} \frac{1}{\text{tempo médio do processo de transição do estado } i \text{ para } j}$$

Os elementos da matriz principal, q_{ii} são as taxas com que o sistema abandona o estado i . A Tabela 11 mostra as taxas de transição entre estados do modelo do sistema (matriz infinitesimal geradora da Cadeia de Markov).

Tabela 11: Matriz Q das taxas de transição entre estados (transições por minuto)

	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃
S ₁	-0,01637	0,015176	0,005971	0,002764	0,038391	1,545016	1,661919	3,101366	7,111615	2,202054	1,427105	0	12,96347	0,022903
S ₃	0,001556	-5,27062	0,005473	0,001728	0,026439	1,047305	37,33333	9,6	0	2,578725	2,458527	0	0	0,034747
S ₅	0,001124	0,011977	-1,34351	0,001108	0,325581	0,011247	0,005749	0,003327	0,005813	0	0,047006	0,003834	56	0,002232
S ₁₀	0,000961	0	0,474576	-0,81176	0	33,6	0	0	0	0	14	0	0	2,333333
S ₁₅	0,000991	0,01988	0,622222	0	-34,0402	0	112	0	0	28	0	0	0	0,383562
S ₁₇	0,001001	0,406607	0	0,646865	4	-69,857	0	0	0	0	0	0	0	0
S ₂₂	0,002106	0,167525	0,004809	0	14	0	-162,673	0	0	0	0	0	0	0
S ₂₂	0,001628	0,305177	0,092715	0,037685	9,333333	28	7	-19,8711	0	28	4,097561	0	62,22222	0,001953
S ₂₇	0,001933	4	0,010995	0	0	0	4,666667	0	-7,2288	6,857143	9,333333	0	0	0
S ₂₉	0,001121	0,014642	0	0,008568	0,307692	0	0	7	0,106538	-67,9928	2,545455	0	0	0,052533
S ₃₁	0,001386	0	0,072072	0,041564	0	0	0	0	0	0	-33,9576	0	48	0,017755
S ₄₁	0,001054	0,291667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,87152	0	2,545455
S ₅₁	0,000678	0,023222	0,053846	0,002848	0,408759	0,053416	0,00517	0,009082	0,004831	0,150134	0,035357	0,019204	-179,186	0,001578
S ₅₃	0,00083	0,014749	0,000834	0,068627	5,6	5,6	0	0,157303	0	0,2047	0,01327	0,848485	0	-5,39605

Conhecendo a matriz Q é possível obter as probabilidade dos estados do sistema em regime estacionário, resolvendo o sistema de equações (17) Para esta resolução recorreu-se ao Solver do Excel (ver resolução no anexo D). Os resultados obtidos (também confirmados pelo resolução do sistema de equações (17) no Mathematica) são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Probabilidades dos estados em regime estacionário

Estado	Prob. Estado (Pi)
S ₁	0,963079234
S ₃	0,002221719
S ₅	0,001230543
S ₁₀	0,019051208
S ₁₅	0,000305184
S ₁₇	0,000220613
S ₁₈	4,10587E-05
S ₂₂	0,000817087
S ₂₇	0,00171888
S ₂₉	0,0001116
S ₃₁	7,56882E-05
S ₄₁	0,008770865
S ₅₁	6,52551E-06
S ₅₃	0,002349795

Uma representação gráfica das probabilidades dos estados em regime estacionário (Figura 15) mostra a grande discrepância existente entre estes valores. Como seria de esperar num sistema de elevada disponibilidade, o

estado S_1 (que corresponde a um estado de funcionamento pleno do aerogerador) é o que apresenta o maior valor de probabilidade.

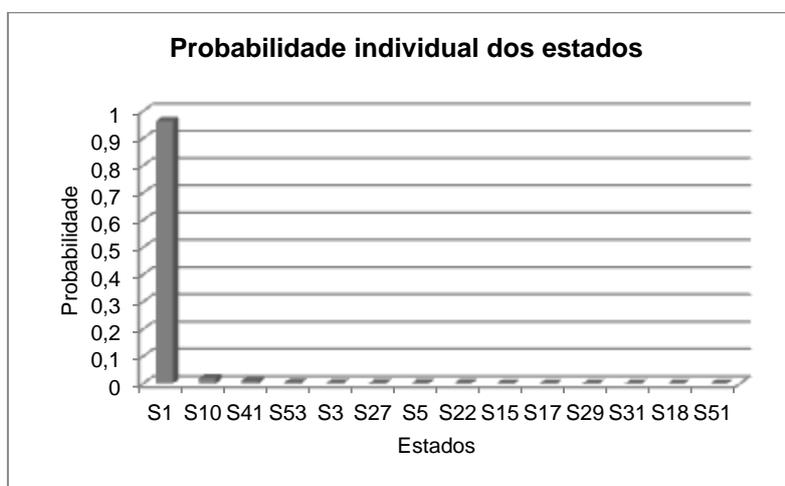


Figura 15: Gráfico de probabilidade individual dos estados

Para cada estado do sistema foram ainda calculados outros indicadores de desempenho: frequências; tempo médio de permanência; e tempo de ciclo. Na Tabela 13 apresentam-se estes indicadores de desempenho para todos os estados do sistema.

Tabela 13: Estados em regime estacionário

Estado	Frequência (minutos ⁻¹)	Duração média (minutos)	Tempo médio de ciclo (minutos)
S₁	0,015765	61,0905	63,433
S₃	0,01171	0,189731	85,398
S₅	0,001653	0,744317	604,87
S₁₀	0,015465	1,2319	64,662
S₁₅	0,010389	0,029377	96,26
S₁₇	0,015411	0,014315	64,887
S₁₈	0,006679	0,0061473	149,72
S₂₂	0,016236	0,0503244	61,59
S₂₇	0,012425	0,138336	80,48
S₂₉	0,007588	0,0147074	131,79
S₃₁	0,00257	0,0294485	389,08
S₄₁	0,007644	1,14742	130,82
S₅₁	0,001169	0,0055808	855,23
S₅₃	0,01268	0,185321	78,867

Utilizando a Equação (25) foram calculadas as frequências individuais de cada estado. Por exemplo, para o estado S_1 a frequência de visita deste estado pode calcular-se do seguinte modo:

$$f_{S_1} = P_{S_1} \times q_{11} \Rightarrow f_{S_1} = 0,0157648$$

Para cada estado S_i pode estimar-se o tempo médio de ocupação pelo inverso do somatório das taxas de saída tal como se mostra na Equação (26). Assim, tem-se, por exemplo, para a duração média de ocupação do estado S_1 :

$$m_{S_1} = \frac{1}{q_{11}} \Rightarrow m_{S_1} = 61,0905 \text{ (minutos)}$$

Por último, o tempo médio de ciclo para o estado S_i (tempo entre duas visitas consecutivas do estado S_i), pode ser calculado com base na Equação (27). Tem-se por exemplo para o estado S_1 :

$$T_{S_1} = \frac{1}{f_{S_1}} \Rightarrow T_{S_1} = 63,4325$$

No gráfico da Figura 16 pode ver-se uma maior regularidade de valores quando comparados com os correspondentes valores obtidos para as probabilidades dos estados em regime estacionário (Figura 15).

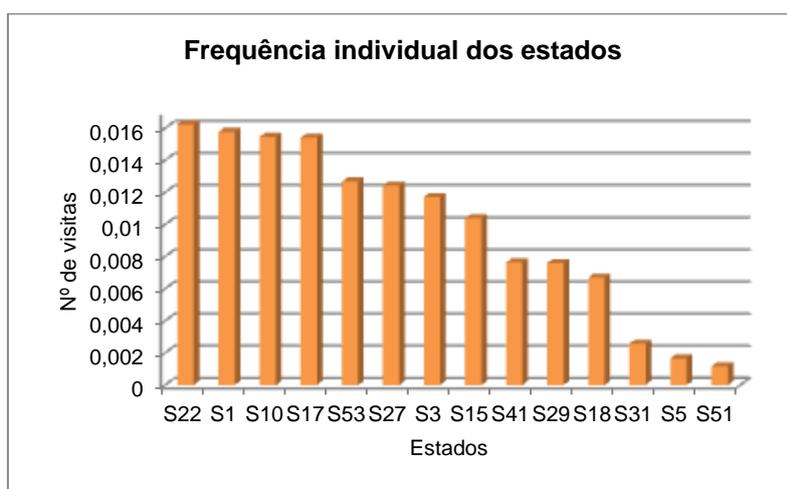


Figura 16: Gráfico de frequência individual dos estados

Verifica-se ainda um conjunto de estados (S_{22} , S_1 , S_{10} e S_{17}) com idênticas frequências de visita, não sendo o estado S_1 o mais visitado, embora seja, com uma grande diferença, o que apresenta maior valor de probabilidade de ocorrência. Tal deve-se ao facto de S_1 ser o estado com o maior tempo médio de ocupação (cerca de 16 vezes maior que a soma do tempo de ocupação de todos os outros estados), como se verifica pelo gráfico da Figura 17.

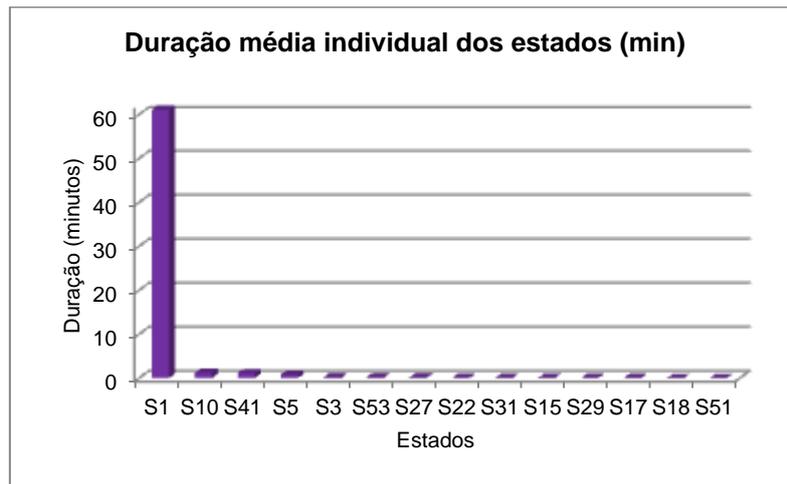


Figura 17: Gráfico de duração média individual dos estados em minutos

No gráfico da Figura 18 mostra-se o tempo de ciclo para cada estado por ordem decrescente de valores. Os estados em abcissa aparecem pela ordem inversa quando comparados com os estados representados em abcissa no gráfico da Figura 16. De fato, pela Equação (27), os estados com maior frequência de ocupação são os estados com menor tempo de ciclo.

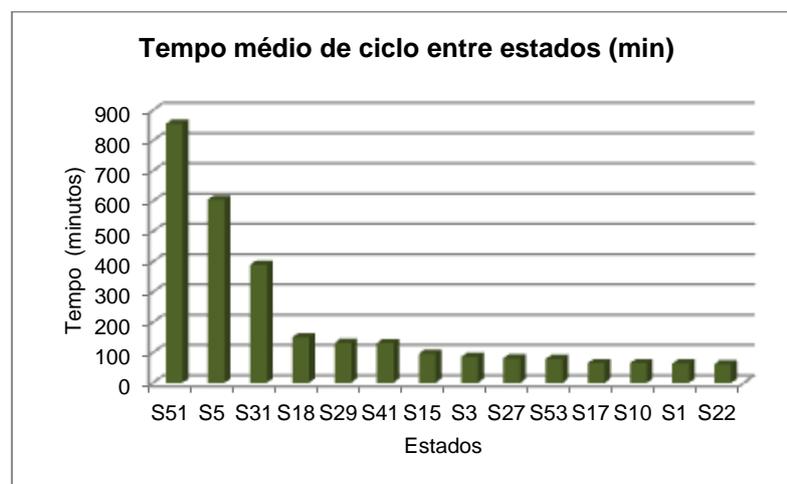


Figura 18: Gráfico de tempo médio de ciclo entre estados em minutos

4.7 Simplificação do diagrama de estados

Como se mostra pela Técnica da Frequência e Duração apresentado na Secção 3.3, o diagrama de estados de um sistema markoviano pode ser simplificado, no limite, para dois estados: um estado de disponibilidade e um estado de falha ou de indisponibilidade. Pela análise do comportamento real do sistema (aerogerador), considerou-se neste processo de simplificação do modelo do sistema que numa primeira fase cada um dos 14 estados seria incluído (classificado) num dos 3 estados agregados apresentados na Tabela 14. Nesta representação simplificada do modelo, o estado s_D representa o conjunto de estados de pleno funcionamento do aerogerador; o estado s_{DP} representa o conjunto de estados de funcionamento degradado do aerogerador, e o estado s_F corresponde ao conjunto de estados de falha do aerogerador.

Tabela 14: Estados do diagrama de estados simplificado

Estado	Designação do estado
S_D	Funcionamento pleno do aerogerador
S_{DP}	Funcionamento em modo degradado
S_F	Falha do aerogerador

Assim, o estado S_D agrega os estados S_1 , S_3 e S_{29} do diagrama de estados do aerogerador; o estado S_{DP} agrega os estados S_{10} , S_{18} , S_{27} e S_{53} ; por sua vez o estado S_F agrega os restantes estados do aerogerador, S_5 , S_{15} , S_{17} , S_{22} , S_{31} , S_{41} e S_{51} . A Figura 19 mostra o diagrama de estados simplificado do sistema, formado pelos 3 estados, S_D , S_{DP} e S_F .

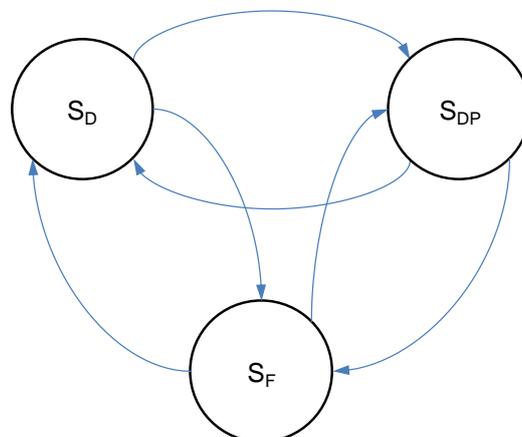


Figura 19: Diagrama de estados simplificado do sistema

A partir das probabilidades dos estados individuais obtidas anteriormente e apresentadas na Tabela 14, pode calcular-se as probabilidades dos estados S_D , S_{DP} e S_F em regime estacionário, como se mostra de seguida:

$$P_{S_D} = P_{S_1} + P_{S_3} + P_{S_{29}} = 0,965413$$

$$P_{S_{DP}} = P_{S_{10}} + P_{S_{18}} + P_{S_{27}} + P_{S_{53}} = 0,02311609$$

$$P_{S_F} = P_{S_5} + P_{S_{15}} + P_{S_{17}} + P_{S_{22}} + P_{S_{31}} + P_{S_{41}} + P_{S_{51}} = 0,0114265$$

Como se mostra na Secção 3.3 pode também o calcular-se a frequência (Equação 28) e o tempo médio de permanência (Equação 29) em cada estado agregado S_D , S_{DP} e S_F . Assim temos para a frequência dos estados:

$$f_{S_D} = f_{S_1} + f_{S_3} + f_{S_{29}} - (P_{S_1} \times (q_{12} + q_{110}) + P_{S_3} \times (q_{21} + q_{210}) + P_{S_{29}} \times (q_{101} + q_{102}))$$

$$f_{S_D} = 0,0318847$$

$$f_{S_{DP}} = f_{S_{10}} + f_{S_{18}} + f_{S_{27}} + f_{S_{53}} - (P_{S_{10}} \times q_{414} + P_{S_{18}} \times q_{79} + P_{S_{53}} \times q_{144})$$

$$f_{S_{DP}} = 0,0402672$$

$$f_{S_F} = f_{S_5} + f_{S_{15}} + f_{S_{17}} + f_{S_{22}} + f_{S_{31}} + f_{S_{41}} + f_{S_{51}} - (P_{S_5} \times (q_{35} + q_{38} + q_{311} + q_{313}) + P_{S_{15}} \times (q_{53} + q_{56} + q_{58} + q_{513}) + P_{S_{17}} \times (q_{63} + q_{68} + q_{613}) + P_{S_{22}} \times (q_{83} + q_{813}) + P_{S_{31}} \times (q_{113} + q_{118} + q_{1113}) + P_{S_{41}} \times (q_{123} + q_{1213}) + P_{S_{51}} \times (q_{133} + q_{138} + q_{1311}))$$

$$f_{S_F} = 0,0419404$$

Pela Equação (29) calcula-se a duração média de ocupação de cada estado agregado, obtendo-se os seguintes resultados:

$$m_{S_D} = \frac{P_{S_D}}{f_{S_D}} = \frac{0,965413}{0,0318847} = 30,28 \text{ minutos}$$

$$m_{S_{DP}} = \frac{P_{S_{DP}}}{f_{S_{DP}}} = \frac{0,0231609}{0,0402672} = 0,58 \text{ minutos}$$

$$m_{S_F} = \frac{P_{S_F}}{f_{S_F}} = \frac{0,0114265}{0,0419404} = 0,27 \text{ minutos}$$

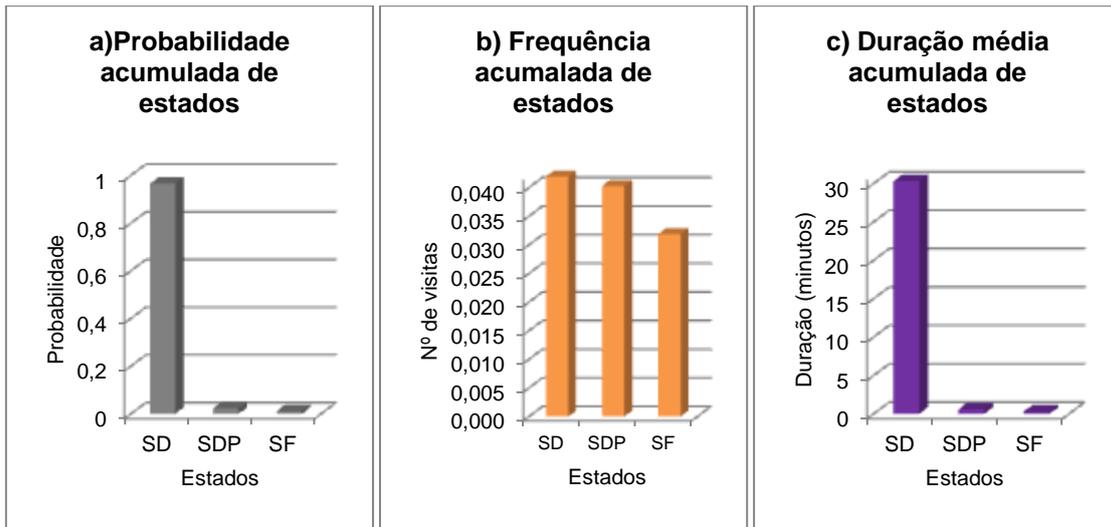


Figura 20: a) Probabilidades dos estados agregados S_D , S_{DP} e S_F ; b) Frequências acumuladas dos estados agregados; c) Tempo médio de permanência nos estados agregados (em minutos)

Verifica-se nos gráficos da Figura 20 que as frequências de S_D , S_{DP} e S_F são praticamente idênticas, porém os estados S_D têm um maior tempo de permanência, o que justifica a maior probabilidade de ocorrência destes estados.

No processo de simplificação levado a cabo neste estudo, procedeu-se, numa 1ª fase, à simplificação do diagrama de estados da Figura 14 para um diagrama de estados com 3 estados. Contudo a Técnica da Frequência e Duração permite a redução de um qualquer diagrama de estados a um diagrama com apenas dois estados, um estado de funcionamento e um estado de falha.

Continuando este processo de simplificação para o limite de dois estados, procedeu-se à supressão Do estado S_{DP} , considerando todos os estados individuais deste estado agregado como estados de falha no diagrama de estados da Figura 21. Sendo assim, no novo diagrama de estados reduzido os 14 estados do modelo de estados do sistema foram agrupados em apenas 2 estados: um estado de disponibilidade, S_D , que agrega todos os estados de disponibilidade plena do aerogerador e um estado de indisponibilidade, S_F , formado por todos os estados de disponibilidade parcial e de indisponibilidade do aerogerador.

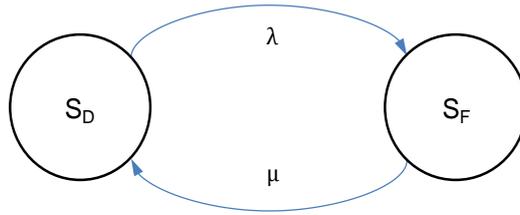


Figura 21: Diagrama reduzido de estados do sistema

As probabilidades acumuladas dos 2 estados do novo modelo são:

$$P_{S_D} = P_{S_1} + P_{S_3} + P_{S_{31}} = 0,965413$$

$$P_{S_F} = P_{S_{10}} + P_{S_{18}} + P_{S_{27}} + P_{S_{53}} + P_{S_5} + P_{S_{15}} + P_{S_{17}} + P_{S_{22}} + P_{S_{29}} + P_{S_{41}} + P_{S_{51}} = 0,034587$$

Avaliando a frequência dos estados S_D e S_F tem-se:

$$f_{S_D} = f_{S_F} = 0,03188456$$

A partir da Equação (29) pode calcular-se o tempo médio de permanência em cada um dos dois estados, obtendo-se:

$$m_{S_D} = 30,278253 \text{ minutos}$$

$$m_{S_F} = 1,084757 \text{ minutos}$$

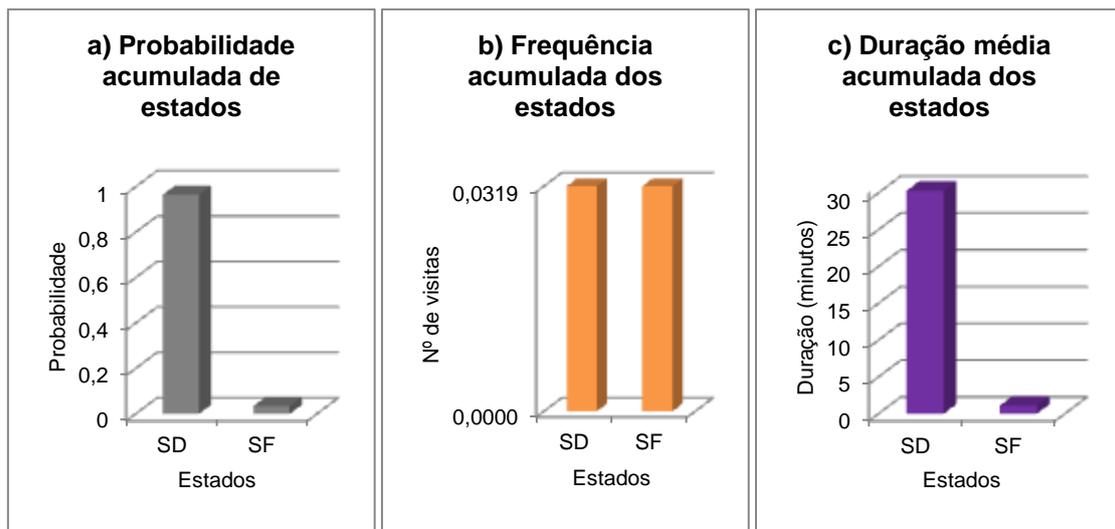


Figura 22: a) Probabilidade dos estados agregados S_D e S_F ; b) Frequência dos estados agregados S_D e S_F ; c) Tempo médio de permanência nos estados do modelo reduzido (em minutos)

Nos gráficos da Figura 22 verifica-se frequências idênticas entre os estados S_D e S_F , mas como era de se esperar, os estados S_D possuem maior duração e conseqüentemente maior probabilidade de ocorrência.

4.8 Índices de fiabilidade

A redução do modelo do sistema a um diagrama com apenas dois estados permite a obtenção de alguns indicadores de desempenho que de outro modo seriam de difícil obtenção. Assim, as taxas de transição entre os estados S_D e S_F podem estimar-se recorrendo à Equação (3), obtendo-se para este caso:

$$\lambda = \frac{f_{S_D}}{P_{S_D}} \Rightarrow \lambda = \frac{0,0318847}{0,965413} = 0,033027005 \text{ falhas/minuto}$$

$$\mu = \frac{f_{S_F}}{P_{S_F}} \Rightarrow \mu = \frac{0,03188456}{0,034587} = 0,921865 \text{ reparações/minuto}$$

A partir do conhecimento das taxas de transição obtém-se as equações de estado (equações diferenciais de Chapman-Kolmogorov (16)):

$$P'_{S_D}(t) = -\lambda \times P_{S_D}(t) + \mu \times P_{S_F}(t)$$

$$P'_{S_F}(t) = \lambda \times P_{S_D}(t) - \mu \times P_{S_F}(t)$$

Resolvendo este sistema de equações diferenciais (recorrendo ao Mathematica) admitindo que no instante $t=0$ o sistema se encontra no estado S_D , obtém-se as probabilidades dos estados em regime transiente:

$$P_{S_D}(t) = \frac{e^{t(-\lambda-\mu)}\lambda + \mu}{\lambda + \mu} \text{ e } P_{S_F}(t) = -\frac{-1 + e^{t(-\lambda-\mu)}\lambda}{\lambda + \mu}$$

Substituindo as taxas de transição pelos valores acima obtém-se:

$$P_{S_D}(t) = 1,04725(0,921857 + 0,033027e^{-0,954884t})$$

$$P_{S_F}(t) = -0,0345874(-1 + e^{-0,954884t})$$

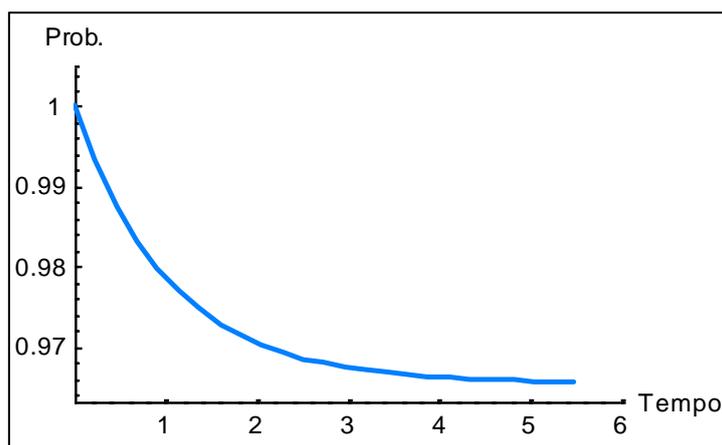


Figura 23: Gráfico de probabilidade do estado S_D no tempo

Determinando os limites de $P_{S_D}(t)$ e de $P_{S_F}(t)$ quando t tende para infinito, obtém-se as probabilidades dos estados S_D e S_F em regime estacionário:

$$P_{S_D}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{S_D}(t) = 0,965413$$

$$P_{S_F} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{S_F}(t) = 0,0345874$$

Um modo alternativo de calcular estas probabilidade passa por resolver o sistema de equações (17). Obter-se-ia deste modo:

$$P_{S_D} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = 0,965413 \text{ e}$$

$$P_{S_F} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = 0,0345874$$

As probabilidades P_{S_D} e P_{S_F} não dependem da forma das distribuições dos processos de falha e de reparação do diagrama de estados reduzido apresentado mas sim dos seus tempos médios de ocorrência (neste caso representados pelas respetivas taxas).

Admitindo que este processos são modelados por distribuições exponenciais (com taxas λ e μ) podem ainda estimar-se outros indicadores de desempenho relacionados com os fatores RAM.

Fatores RAM do aerogerador

Fiabilidade

Admitindo as considerações acima, têm-se os seguintes indicadores da fiabilidade do aerogerador em estudo:

$$R(t) = e^{-0,033027005t}$$

$$f_{\lambda}(t) = 0,033027005 e^{-0,033027005t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-0,033027005t}$$

Manutibilidade

$$f_{\mu}(t) = \mu e^{-\mu t}$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \times f_{\mu}(t) dt = \frac{1}{\mu} = 1,084758 \text{ minutos}$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = 30,27825 \text{ minutos}$$

Tempo de indisponibilidade anual = $60 \times 30 \times 24 \times 12 \times P_{SF} = 17.929,90$ minutos/ano

Disponibilidade e Indisponibilidade

Dado que o modelo reduzido do sistema tem apenas um estado de falha e um estado de funcionamento,

$$A(t) = P_{SD}(t) = \frac{e^{t(-\lambda-\mu)}\lambda + \mu}{\lambda + \mu} = 1,04725(0,921857 + 0,033027e^{-0,954884t})$$

$$\bar{A}(t) = P_{SF}(t) = -\frac{-1 + e^{t(-\lambda-\mu)}\lambda}{\lambda + \mu} = -0,0345874(-1 + e^{-0,954884t})$$

A disponibilidade e a indisponibilidade em estado estacionário podem obter-se calculando,

$$A(\infty) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = 0,965413$$

$$\bar{A}(\infty) = 1 - A(\infty) = 0,0345874$$

Numa situação mais comum a disponibilidade é calculada pelo somatório das probabilidades de todos os estados operacionais do modelo. De modo idêntico, a indisponibilidade é obtida pelo somatório das probabilidades dos estados de falha.

4.9 Análise crítica dos resultados

Segundo os cálculos realizados neste estudo de caso, o sistema eólico estudado tem um tipo de aerogerador com uma disponibilidade operacional plena de aproximadamente 96,5%, uma disponibilidade operacional parcial de 2,3% e um indisponibilidade de 1,1%. Centrando a análise no diagrama de estados da Figura 24 verifica-se que as oportunidades de melhoria da disponibilidade do sistema residem na redução das probabilidades dos estados S_{DP} e S_F . Tal redução pode fazer-se pelo lado da manutenção, através de uma redução dos tempos de indisponibilidade, e/ou pelo lado da melhoria da fiabilidade dos componentes/partes, reduzindo a frequência de falhas.

Como se mostra nos gráficos da Figura 24, tanto o estado S_{DP} como o S_F agrega vários estados do aerogerador com valores de probabilidades muito distintos que se devem em boa medida ao tempo de permanência nestes estados como se vê pelos gráficos da Figura 25.

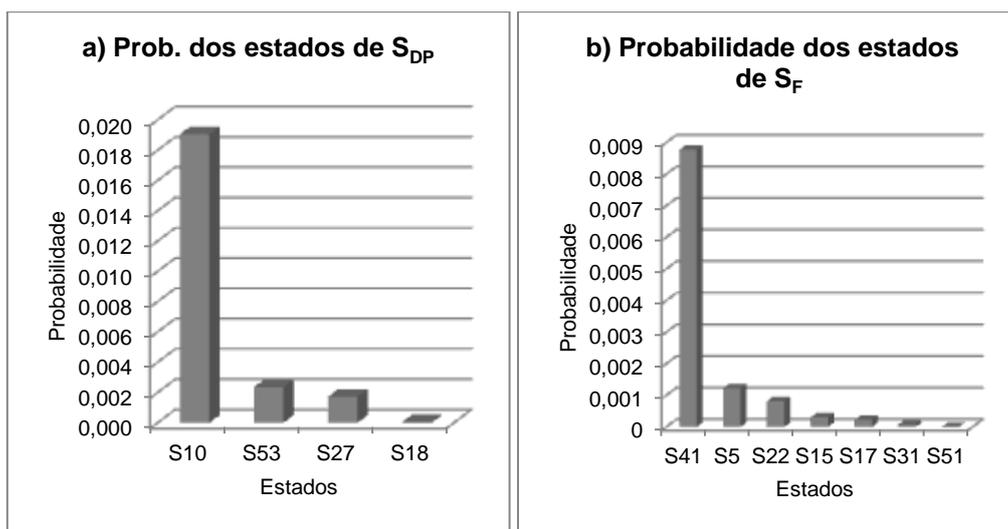


Figura 24: Probabilidades dos estados do aerogerador que compõem os estados agregados S_{DP} e S_F

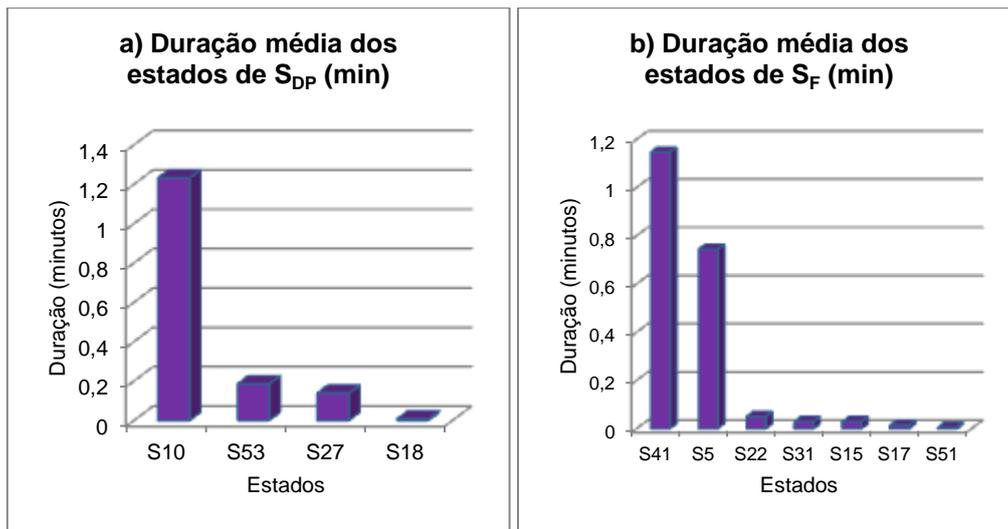


Figura 25: Tempos médios de permanências nos estados do aerogerador que compoem os estados agregados S_{DP} e S_F

Dentre os estados de disponibilidade operacional parcial e indisponibilidade operacional podem encontrar-se oportunidades de melhoria.

O estado que mais contribui para a disponibilidade parcial é o estado S_{10} que corresponde à deteção de gelo nas pás do aerogerador. O gelo, a geada ou neve causadas por determinadas condições meteorológicas pode acumular-se nas pás dos aerogeradores provocando a ocorrência deste estado, e conseqüentemente, uma diminuição da eficiência do aerogerador ou, no limite, a paragem do mesmo. Nestas circunstâncias, a equipa de manutenção deve fazer uma inspeção visual e após a verificação da inexistência de gelo ou de humidade, o aerogerador é reiniciado manualmente. Porventura se neste reinício do aerogerador se detetar a presença de gelo ou humidade, o reinício é abortado e o aerogerador é colocado no estado de indisponibilidade, S_{31} . Neste estado o aerogerador é aquecido para evaporar o gelo e a humidade antes de ser reiniciado. Trata-se de uma operação de proteção preventiva do gerador, que no entanto consome energia diminuindo assim a produção do parque eólico.

O estado S_{10} (deteção de gelo) é o estado que mais contribui para a probabilidade do estado agregado de disponibilidade parcial S_{DP} (representando mais de 80% da probabilidade) e por isso, é o estado que deveria receber uma especial atenção por parte da equipa de manutenção.

Uma análise semelhante ao estado agregado de indisponibilidade S_F identifica o estado do aerogerador S_{41} (proteção de disjuntor desarmado) como o que maior contribuição dá para o estado agregado de falha S_F . Todos os motores do aerogerador têm contactores e ao ser detetada uma sobrecorrente, o aerogerador é desligado automaticamente para não danificar os seus principais componentes. O reinício do aerogerador é feito pela equipa de manutenção após uma inspeção e verificação da causa da sobrecorrente.

Pelo gráfico b da Figura 24 tira-se que cerca de 77% da indisponibilidade do aerogerador depende do estado S_{41} e este, em grande medida, da intervenção humana para a reposição da máquina no seu estado normal de funcionamento. O estado S_5 , com a segunda a segunda maior probabilidade de ocorrência dentre os estados de indisponibilidade, evidencia também esta situação; o tempo de permanência significativo e depende a intervenção da equipa de manutenção.

Em suma, os estados do aerogerador que mais contribuem para a sua perda de disponibilidade são estados pertencentes aos estados agregados S_{DP} e S_F cujos tempos de permanência dependem da eficiência de intervenção das equipas de manutenção.

5. Conclusão e propostas de trabalhos futuros

Com a globalização da economia e um mercado cada vez mais exigente, que busca produtos e sistemas de alto desempenho a custos reduzidos deu-se a necessidade de minimização de falhas e uma maior atenção na fiabilidade e na manutibilidade dada a sua influência direta na disponibilidade dos produtos/sistemas tecnológicos.

Este enquadramento mostra a relevância e a atualidade do tema tratado nesta dissertação, onde o trabalho de investigação desenvolvido visou mostrar a importância dos fatores RAM em sistemas tecnológicos e, em particular, em geradores eólicos de produção de energia elétrica. Da revisão da literatura efetuada constatou-se que são muito escassos os estudos publicados sobre os fatores RAM em aerogeradores com dados reais. Tal deve-se, em grande medida, à dificuldade na obtenção destes dados junto das empresas que operam com parques eólicos.

A revisão bibliográfica possibilitou, fundamentalmente, o conhecimento dos fatores RAM do ponto de vista qualitativo e quantitativo, e também uma maior perceção da relação dos fatores RAM com os custos nas várias fases do ciclo de vida de um sistema. Como se mostra em variados estudos, os fatores RAM devem ser considerados em todas as fases do ciclo de vida de um sistema tecnológico para se garantir resultados ótimos em termos de custo de ciclo de vida. Dos custos associados a um sistema eólico, os custos de operação e manutenção são uma parcela importante por ocorrerem durante um longo período de tempo (cerca de 25 anos) e afetarem diretamente nos retornos financeiros. Estas razões associadas ao fato de se dispor de um conjunto extenso de dados relativos ao comportamento (funcionamento, paragem, falha,...) dos aerogeradores de um parque eólico, motivaram o estudo de caso apresentado neste trabalho.

No estudo de caso foi avaliado o desempenho de aerogeradores a partir da aplicação de técnicas da análise RAM a um conjunto de dados dos estados dos aerogeradores referentes a dois anos de operação (2009 e 2010). Os resultados do estudo mostram que se trata de equipamentos com uma elevada

disponibilidade (superior a 95%) mas também que existem oportunidades de melhoria tanto ao nível das operações/políticas de manutenção como na melhoria da fiabilidade de componentes/partes críticos. Os custos de indisponibilidade (custos de oportunidade pela perda de produção) são de tal ordem de grandeza que ganhos de disponibilidade dos aerogeradores muito pequenos (na ordem de 1%) permitiriam um aumento muito significativo da faturação do parque.

Apesar dos avanços ao nível dos fatores RAM verificados na última década nos aerogeradores este domínio constitui um campo de investigação com muito para explorar em trabalhos futuros. Refira-se ainda que a base de dados utilizada neste estudo de caso possibilita outras análises sobre os aerogeradores, pelo que deverá servir de base para outros estudos técnico-económicos, certamente relevantes para a redução do custo do ciclo de vida dos aerogeradores.

Referências Bibliográficas

- Billinton, R.; Allan, A.; (1983), "*Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques*," Longman scientific and technical.
- Cauffriez, L.; Benard, V; Renaux, D.; (2006), "*A New Formalism for Designing and Specifying RAMS Parameters for Complex Distributed Control Systems: The Safe-SADT Formalism*," Reliability, IEEE Transactions on , vol.55, no.3, pp.397-410.
- Chan, F. T. S.; Lau, H. C. W.; (2005), "*Implementation of Total Productive Maintenance: a case study*," Int. J. Production Economics (95), pp. 71-94.
- Deshpande, V.S.; Modak, J.P.; (2002). "*Application of RCM to a medium scale industry, Reliability Engineering and System Safety*," vol. 77, no. 1, pp. 31-43.
- Eti, M.C.; Ogaji, S.O.T; Probert, S.D.; (2007), "*Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-statio*," Applied Energy, vol. 84, Edição 2, pp. 202-221.
- Fogliatto, F.S.; Ribeiro, J.L.D.; (2009), "*Confiabilidade e manutenção industrial*," Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- Fuqua, N. B.; (2003), "*The applicability of markov analysis methods to reliability, maintainability, and safety*," Selected Topics in Assurance Related Technologies START, 10(2).
- Guthrie, V.H.; Farquharson, J.A.; Bonnett, R.W.; Bjoro, E.F., Jr.; (1990), "*Guidelines for integrating RAM considerations into an engineering Project*," Reliability, IEEE Transactions on, vol.39, no. 2, pp.133-139.
- Herbert, J.G.M; Iniyar,S; Goic, R.; (2010), "*Performance, reliability and failure analysis of wind farm in a developing Country*," Renewable Energy, vol. 35, Issue 12, pp. 2739-2751.
- Herder, P.M; Luijk, J.A; Bruijnooge, J.; (2008), "*Industrial application of RAM modeling: Development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan(R) plant at GE Industrial, Plastics*," Reliability Engineering & System Safety, vol. 93, Issue 4, pp. 501-508.
- Komal; Sharma, S.P; Kumar, D.; (2010), "*RAM analysis of repairable industrial systems utilizing uncertain data*," Applied Soft Computing, vol. 10, Issue 4, pp. 1208-1221.
- Kumar, V.; (2008), "*RAM analysis of SATCOM terminal - A case study*," Electromagnetic Interference & Compatibility. INCEMIC 2008. 10th International Conference on, pp.639-643.
- Lafraia, J.R.B.; (2001), "*Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade*," Rio de Janeiro, Qualitymark: Petrobras.
- Lanza, G.; Werner, P.; Niggenschmidt, S.; (2009), "*Adapted Reliability Prediction by Integrating Mechanical Load Impacts*," 55th Annual Reliability & Maintainability Symposium, pp. 83-88.

Lundteigen, M. A.; Rausand, M.; Utne, I. B.; (2009) "*Integrating RAMS engineering and management with the safety life cycle of IEC 61508*," Reliability Engineering and System Safety. Science Direct. Elsevier.

Markeset, T.; Kumar, U.; (2001), "*R&M and risk-analysis tools in product design, to reduce life cycle cost and improve product attractiveness*," Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, New York, NY, pp. 116-21.

Markeset, T.; Kumar, U.; (2003), "*Integration of RAMS information in design processes – a case study*," paper presented at the 2003 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 20-24 January, Tampa, FL.

Markeset, T.; Kumar, U. (2003-a), "*Design and development of product support and maintenance concepts for industrial systems*," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 9, no. 4, pp. 376-92.

Markeset, T.; Kumar, U. (2003-b), "*Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work processes*," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 9, no. 4, pp. 393-410.

Markeset, T.; Kumar, U.; (2004), "*Dimensioning of product support: issues, challenges, and opportunities*," Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, New York, NY, pp. 565-70.

McFadden, R.H.; (1990), "*Developing a database for a reliability, availability, and maintainability improvement program for an industrial plant or commercial building*," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.26, no.4, pp.735-740.

Morais, L.; (2005), "*Desenvolvimento de ferramentas para a aplicação da metodologia RAMS a equipamentos industriais*," Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, 2005.

Moubray, J.; (1997), "*Reliability centered maintenance*," Oxford: Butterworth Heinemann, 2nd ed.

Nakajima, S.; (1988), "*Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*," Portland, OR, Productivity Press.

Nilsson, J.; Bertling, U.; (2007), "*Maintenance management of wind power systems using Condition Monitoring Systems*," Power Engineering Society General Meeting, IEEE, pp. 24-28.

NP EN 50126 (2000), "*Aplicações Ferroviárias: Especificação e Demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança (RAMS)*," Instituto Português de Qualidade.

NP EN 13306 (2007), "*Terminologia da manutenção*," Norma Portuguesa, Instituto Português de Qualidade, Comité Europeu de Normalização.

Nunes, E.; Faria, J. A.; Matos, M. A.; (2002), "*A comparative analysis of dependability assessment methodologies*," Proceedings of the $\lambda\mu 13$ ESREL Conference, Lyon, pp. 228-235.

Nunes, E.; Faria, J. A.; Matos, M. A.; (2004), "*Abordagem hierárquica para avaliação da fiabilidade de sistemas de produção complexos com comportamento não-markoviano*," Inv. Op., vol.24, no.2, p.159-186.

Nunes, E.; (2005), "System reliability with non markovian processes and with fuzzy parameters," PhD. Thesis (in Portuguese), Porto University, Portugal.

Parida, A.; Kumar, U.; (2006), "Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges," Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 12, Issue 3, pp. 239 – 251.

Pinto, C.V.; (2002), "Organização e Gestão da manutenção," Lisboa, Monitor – projetos e Edições, Lda.

PortalMidia; (2009), "PortalMidia.net," www.portalmidia.net 30/06/2009 Acesso em 10/2011.

Rajpal, P.S.; Shishodia, K.S.; Sekhon, G.S.; (2006), "An artificial neural network for modeling reliability, availability and maintainability of a repairable system," Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, no. 7, pp. 809-19.

Ramakumar, R.; (1993), "Engineering Reliability – Fundamentals and applications," Prentice Hall International Editions.

Rausand, M.; Oien, K.; (1996). "The basic concepts of failure analysis," Reliability Engineering System Safety; pp. 73–83.

Sharma, R.K.; Kumar, S.; (2008), "Performance Modeling in Critical Systems Using RAM Analysis," Reliability Engineering and System Safety 93, pp. 913-919.

Shirose, K.; (1996), "Total Productive Maintenance: new implementation program in fabrication and assembly industries," Tokyo, Japan Institute of Plant Maintenance.

Sikos, L.; Klemeš, J.; (2009), "RAMS contribution to efficient waste minimisation and management," Journal of Cleaner Production, vol. 17, Issue 10, pp 932-939.

Suzuki, T.; (1994). "TPM in Process Industries," Portland, OR, Productivity Press.

Vintr, Z.; Vintr, M.; (2007), "RAMS Program for Electromechanical Systems of Railway Applications," System Safety, 2nd Institution of Engineering and Technology International Conference on, pp.200-205.

Wikstrom, P.; Terens, L.; Kobi, H.; (1998) "Reliability, availability and maintainability (RAM) of high power variable speed drive systems (VSDS)," Petroleum and Chemical Industry Conference. Industry Applications Society 45th Annual, pp.139-148.

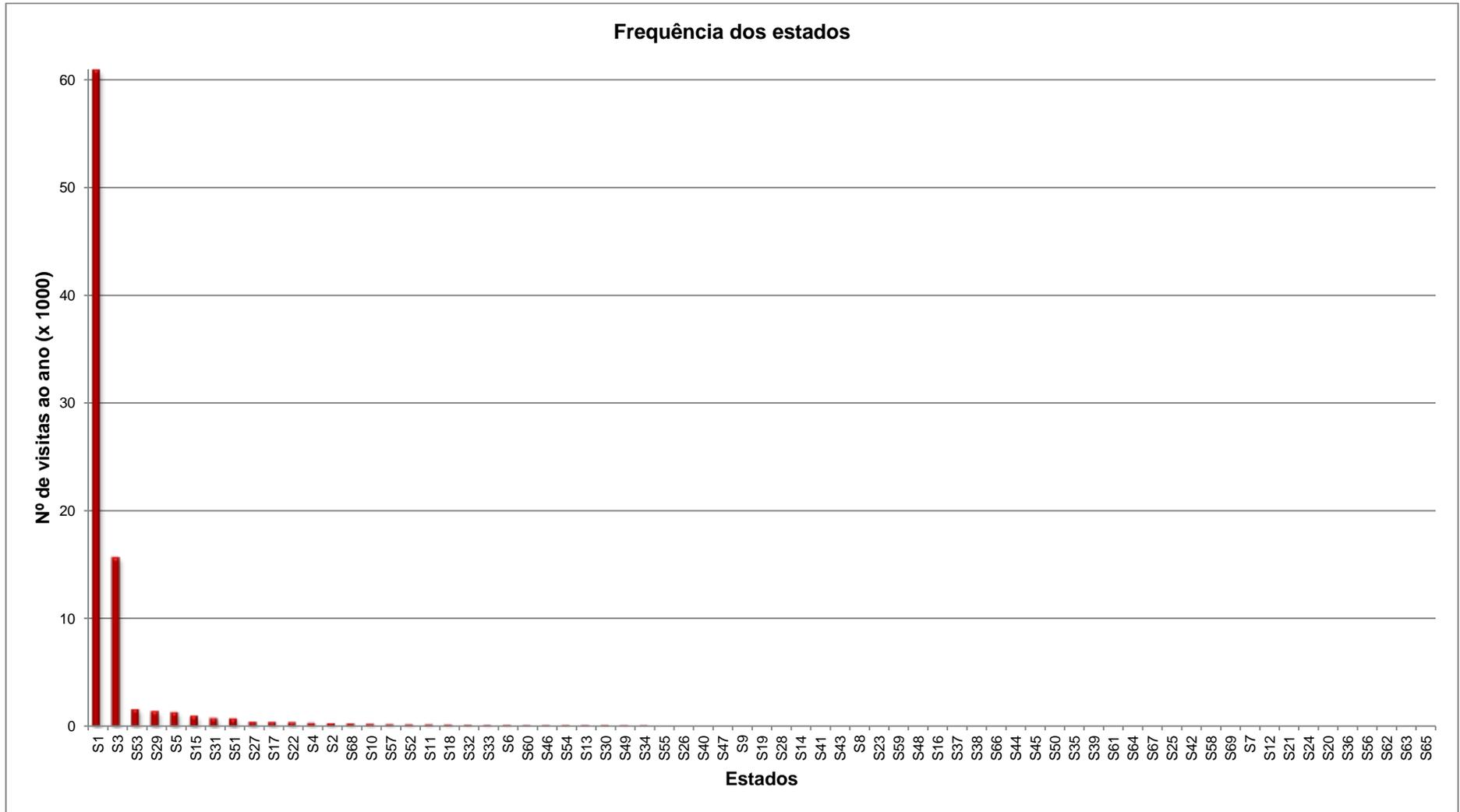
Anexos

Anexo A

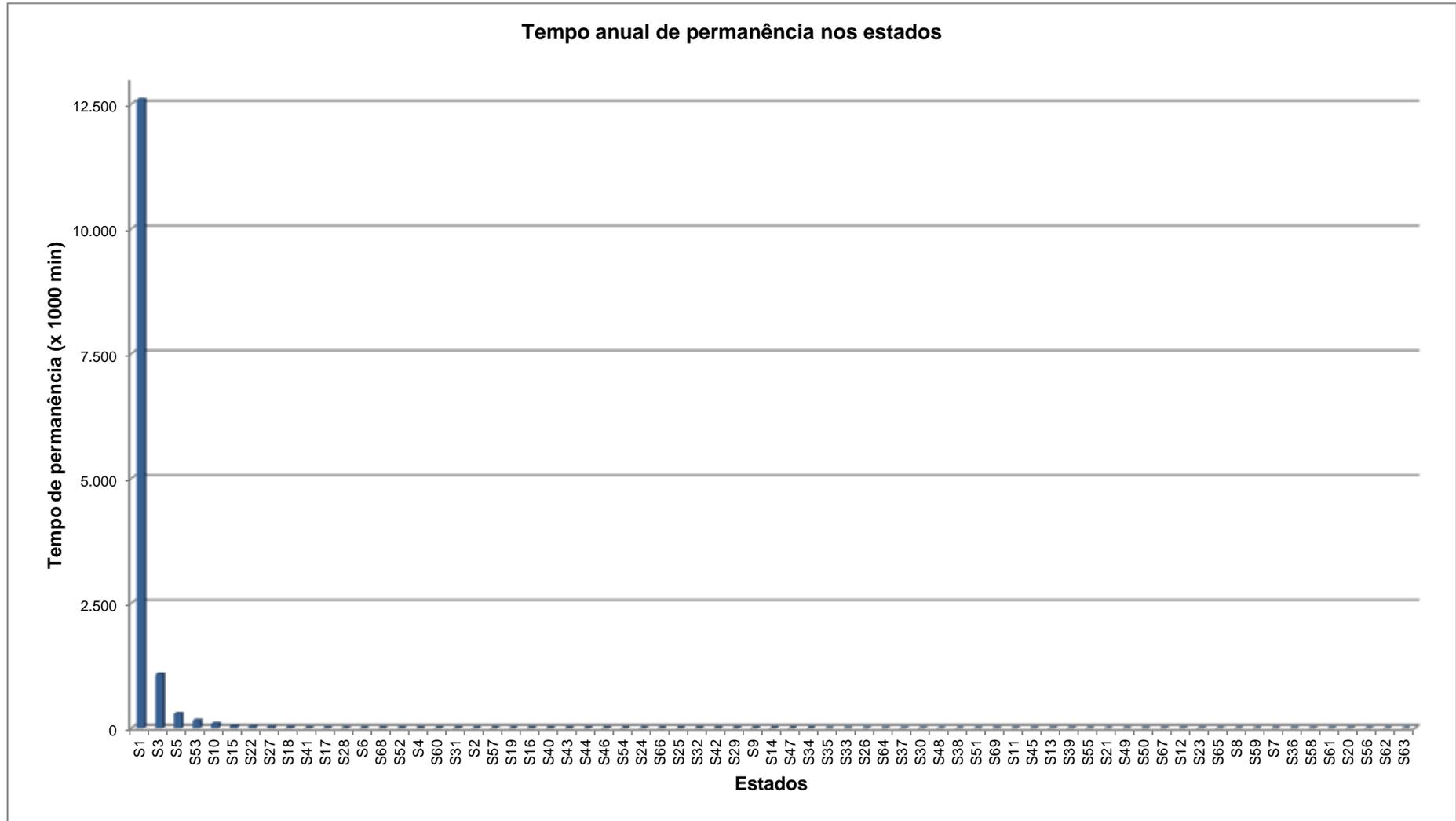
A.1 Gráfico do indicador de frequência anual dos 69 estados do sistema

A.2 Gráfico do indicador de tempo anual de permanência dos 69 estados do sistema

A.1 Gráfico do indicador de frequência anual dos 69 estados do sistema



A.2 Gráfico do indicador de tempo anual de permanência dos 69 estados do sistema



Anexo B

B.1 Descrição detalhada dos estados de E do aerogerador

B.1 Descrição detalhada dos estados de E do aerogerador

- **S₁ – Turbina em operação:** Turbina em operação é o estado mais freqüente e com maior tempo total de permanência de todos os estados, durante os dois anos. Isto é um comportamento natural esperado, pois significa que o aerogerador está a trabalhar em operação normal, sem problemas técnicos e fatores ambientais propícios.
- **S₃ – Falta de vento:** Falta de vento é o segundo estado mais freqüente e com maior tempo total de permanência de todos os estados apresentados nestes dois anos de funcionamento de cada aerogerador do sistema. Este estado é indicado quando não há vento com velocidade mínima suficiente para haver produção. Este fenómeno natural é um evento independente de fatores humanos ou tecnológicos. Ao ter uma velocidade de vento mínima de 2 m/s, o aerogerador é reiniciado automaticamente.
- **S₅ – Manutenção:** O estado de manutenção informa que o aerogerador está a sofrer atividades de manutenção. Estas atividades podem ser de manutenção corretiva, pela ocorrência de alguma avaria, ou pode ser de manutenção planeada com o intuito de prevenir que alguma falha venha ocorrer e interromper o normal funcionamento do sistema. Após estas atividades o sistema volta a funcionar normalmente. É um estado comum às Tabelas 2 e 3.
- **S₁₀ – Detecção de gelo:** Quando há deteção de gelo, o aerogerador pode não parar de funcionar, mas ter diminuição da sua eficiência à temperaturas acima de 2°C. Mas se a temperatura estiver abaixo de 2°C pode ocorrer um desligamento automático.
- **S₁₅ – Cabo torcido:** Este estado informa que o cabo da torre está torcido, impossibilitando o aerogerador de continuar em operação normal. Isto ocorre devido ao movimento das pás que se orientam pela direção do vento, que faz com que a barquinha gire, e

consequentemente torça o cabo. Nesta situação a produção é interrompida por cerca de 30 minutos até que termine o processo de distorção do cabo da torre. Após este intervalo o aerogerador torna a produzir automaticamente.

- **S₁₇ – Falha de inversão de giro:** Falha na inversão de giro indica uma falha no controlo da inversão de giro, o qual garante que a turbina está sempre orientada para o vento.
- **S₁₈ - *Anemometer interface*:** Este estado é uma mensagem de aviso de falha no anemómetro, impossibilitando a medição da velocidade do vento.
- **S₂₂ – Erro no controlo do *pitch*:** *Pitch* é o nome que se dá ao conjunto de equipamentos que tem a função de rodar a pá para que esta fique perpendicular ou paralelo ao vento. Erro no controlo do *pitch* indica que houve um erro no deslocamento de uma das pás ao abrir e fechar.
- **S₂₇ - Falha no controlo de carga na pá:** A falha no controlo de carga numa pá significa que foi exercido numa pá uma carga (flexão, esforço, curvatura) que ultrapassou seu limite admissível para o controlo. O aerogerador continua a funcionar mas com potência reduzida.
- **S₂₉ – Falha de rede:** Falha de rede é um estado que pode ser interpretado que ocorreram várias falhas na rede, no prazo de 24 horas, provocando uma falha de tensão, impossibilitando o aerogerador de reiniciar automaticamente. Este é um dos eventos mais frequentes e que representa uma falha externa e não uma falha do aerogerador.
- **S₃₁ – Falha de alimentação:** Falha de alimentação é uma mensagem particular para o reinício automático do aerogerador quando ocorre uma falha na conversão de energia em tensão contínua no retificador do aerogerador.

- **S₄₁ – Proteção de disjuntor desarmado:** Este estado indica que o disjuntor de proteção foi acionado devido a uma sobrecarga de corrente elétrica, fazendo a turbina parar. E neste caso o aerogerador fica parado até que o pessoal de manutenção faça uma verificação completa do ocorrido.
- **S₅₁ – Turbina reiniciada:** Quando ocorre uma falha e o aerogerador não consegue reiniciar automaticamente, o pessoal de manutenção reinicia-o manualmente, e então este estado é registado.
- **S₅₃ – Controlo remoto PC:** Este é um estado que significa que o aerogerador não tem comunicação, ou seja, não é possível aceder remotamente, mas pode estar produzindo normalmente. Isso indica que há problemas nos sensores do aerogerador, sendo necessário reiniciar manualmente o aerogerador.

Anexo C

C.1 Exemplo de Tabela de tempo entre estados (em minutos) utilizada na Macro do excel

C.2 Algoritmo da Macro do Excel para obtenção dos t_{ijk} para mudar do estado S_i até o estado S_j ($i, j \in E$ e $i \neq j$) de cada M_k

C.3 Matriz de tempo total de transição entre estados do aerogerador M1 obtida por C.2

C.4 Matriz de frequências de transição entre estados do aerogerador M1 obtida por C.3

C.1 Exemplo de Tabela de tempo entre estados (em minutos) utilizada na Macro do excel

Estado	Tempo (minutos)
S₃₁	2
S₁	2
S₁	1
S₁	783
S₃	28
S₁	0
S₁	1
S₁	459
S₃	11
S₁	0
S₁	4
S₁	17
S₃	47
S₁	0
S₁	2
S₁	1050
S₃	36
S₁	0
S₁	4
S₁	29
S₃	191
S₁	0
S₁	3
S₁	1073
S₃	37
S₁	0
S₁	2
S₁	179
S₁	0
S₅	332
S₁	2
S₁	11
S₁	0
S₅	41
S₁	1
S₁	1002
S₁	0
S₅	47
S₁	60
S₁	4
S₅	261

C.2 Código Visual Basic da Macro do Excel para obtenção dos t_{ijk} para mudar do estado S_i até o estado S_j ($i, j \in E$ e $i \neq j$) de cada M_k

```
Function soma_tempo(estado_inicial, estado_final, Tabela As Range)
```

```
    estado = -2
```

```
    tempo_total = 0
```

```
    tempo_parcial = 0
```

```
    contador = 0
```

```
    If estado_inicial = estado_final Then 'para evitar preencher a diagonal
```

```
        soma_tempo = ""
```

```
        Exit Function
```

```
    End If
```

```
    For linha = 1 To 10000
```

```
        estado_anterior = estado
```

```
        estado = Tabela.Cells(linha, 1)
```

```
        tempo = Tabela.Cells(linha, 2)
```

```
        If IsEmpty(estado) Then Exit For 'sai quando encontra a primeira linha vazia
```

```
        If estado = estado_inicial Then
```

```
            tempo_parcial = tempo_parcial + tempo
```

```
        End If
```

```
        If estado = estado_final And estado_anterior = estado_inicial Then
```

```
            tempo_total = tempo_total + tempo_parcial
```

```
            contador = contador + 1
```

```
            tempo_parcial = 0
```

```
        End If
```

```
        If estado <> estado_inicial Then tempo_parcial = 0
```

```
    Next linha
```

```
    If contador > 0 Then
```

```
        soma_tempo = tempo_total + contador / 10000
```

```
    Else
```

```
        soma_tempo = ""
```

```
    End If
```

```
End Function
```

C.3 Matriz de tempo total de transição entre estados do aerogerador M1 obtida por C.2

	S₁	S₃	S₅	S₁₀	S₁₅	S₁₇	S₁₈	S₂₂	S₂₇	S₂₉	S₃₁	S₄₁	S₅₁	S₅₃
S₁		557.948	74.956	9.646	44.795	766	521	5.452	18.998	63.965	9.868	790	81.166	77.697
S₃	40.680		37		655				3	161			19	184
S₅	12.303	314												3.789
S₁₀	7.134	360	5.989								1.480			
S₁₅	154	2.058												
S₁₇	0													
S₂₂	6		3										63	
S₂₂	2								0	0			158	
S₂₇	1	0	676							1			1.866	
S₂₉	32	2							0		0		2	15
S₃₁	48	4		4									886	5
S₄₁			622											
S₅₁	5							0		0	0			
S₅₃	1.398	1.680	9.729										6.168	

C.4 Matriz de frequências de transição entre estados do aerogerador M1 obtida por C.3

	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃		
S ₁			685	69	17	42	1	10	16	22	68	41	1	23	63	
S ₃	731			2		16				1	2			1	4	
S ₅	75	4													4	
S ₁₀	13	1	3									4				
S ₁₅	4	54														
S ₁₇	1															
S ₂₂	8			1											1	
S ₂₂	11									2	1				6	
S ₂₇	12	1	2								1				11	
S ₂₉	63	4								2		1			1	3
S ₃₁	32	5			4										6	1
S ₄₁				1												
S ₅₁	52								4		2	1				
S ₅₃	57	3	5												10	

Anexo D

D.1 Tabela de cálculo do sistema de equações pelo Solver do Microsoft Excel

D.1 Tabela de cálculo pelo Solver do Microsoft Excel da probabilidade dos estados pelo sistema de equações (17)

	PS ₁	PS ₃	PS ₅	PS ₁₀	PS ₁₅	PS ₁₇	PS ₁₈	PS ₂₂	PS ₂₇	PS ₂₉	PS ₃₁	PS ₄₁	PS ₅₁	PS ₅₃	Σ P		
	0,963079	0,002222	0,001231	0,019051	0,000305	0,000221	4,11E-05	0,000817	0,001719	0,000112	7,57E-05	0,008771	6,53E-06	0,00235	1		
																1º membro	term ind.
	S ₁	S ₃	S ₅	S ₁₀	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₂₂	S ₂₇	S ₂₉	S ₃₁	S ₄₁	S ₅₁	S ₅₃			
S ₁	-0,01637	0,015176	0,005971	0,002764	0,038391	1,545016	1,661919	3,101366	7,111615	2,202054	1,427105	0	12,96347	0,022903		5,069E-18	0
S ₃	0,001556	-5,27062	0,005473	0,001728	0,026439	1,047305	37,333333	9,6	0	2,578725	2,458527	0	0	0,034747		-1,21E-17	0
S ₅	0,001124	0,011977	-1,34351	0,001108	0,325581	0,011247	0,005749	0,003327	0,005813	0	0,047006	0,003834	56	0,002232		2,624E-17	0
S ₁₀	0,000961	0	0,474576	-0,81176	0	33,6	0	0	0	0	14	0	0	2,333333		1,475E-17	0
S ₁₅	0,000991	0,01988	0,622222	0	-34,0402	0	112	0	0	28	0	0	0	0,383562		1,919E-17	0
S ₁₇	0,001001	0,406607	0	0,646865	4	-69,857	0	0	0	0	0	0	0	0		-3,47E-18	0
S ₂₂	0,002106	0,167525	0,004809	0	14	0	-162,673	0	0	0	0	0	0	0		5,204E-18	0
S ₂₇	0,001628	0,305177	0,092715	0,037685	9,333333	28	7	-19,8711	0	28	4,097561	0	62,22222	0,001953		-5,57E-18	0
S ₂₉	0,001933	4	0,010995	0	0	0	4,666667	0	-7,2288	6,857143	9,333333	0	0	0		-6,15E-17	0
S ₃₁	0,001121	0,014642	0	0,008568	0,307692	0	0	7	0,106538	-67,9928	2,545455	0	0	0,052533		1,03E-18	0
S ₄₁	0,001386	0	0,072072	0,041564	0	0	0	0	0	0	-33,9576	0	48	0,017755		1,253E-17	0
S ₅₁	0,001054	0,291667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,87152	0	2,545455		8,674E-19	0
S ₅₃	0,000678	0,023222	0,053846	0,002848	0,408759	0,053416	0,00517	0,009082	0,004831	0,150134	0,035357	0,019204	-179,186	0,001578		-5,66E-19	0
S ₅₃	0,00083	0,014749	0,000834	0,068627	5,6	5,6	0	0,157303	0	0,2047	0,01327	0,848485	0	-5,39605		-3,47E-18	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1