



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Análise e Avaliação de Períodos de Inspeção
em Sistemas de Natureza Tecnológica

Mariana Teixeira Baptista de Carvalho

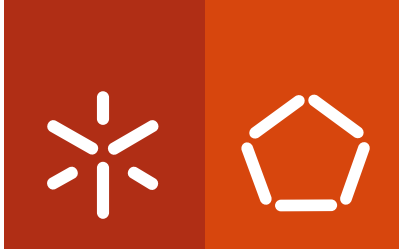
UMinho | 2012

Mariana Teixeira Baptista de Carvalho

**Análise e Avaliação de Períodos de
Inspeção em Sistemas de
Natureza Tecnológica**

março 2012





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mariana Teixeira Baptista de Carvalho

**Análise e Avaliação de Períodos de
Inspeção em Sistemas de
Natureza Tecnológica**

Programa Doutoral em Engenharia Industrial e de Sistemas

Trabalho realizado sob a orientação do

Professor Doutor Eusébio Manuel Pinto Nunes

e do

Professor Doutor José Manuel Henriques Telhada

março 2012

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Aos meus pais.

Agradecimentos

Aos Professores Eusébio Nunes e José Telhada, não só pela orientação deste trabalho, mas também pela confiança e compreensão demonstradas em todos os momentos;

Ao IPCA, pela atribuição da bolsa PROTEC, em 2009/10 e 2010/11, que em muito contribuiu para o avanço dos trabalhos;

Aos meus colegas do Departamento de Ciências do IPCA pela solidariedade, incentivo e amizade demonstradas em todo o processo;

À empresa que forneceu os dados para a aplicação real das metodologias desenvolvidas nesta tese, e que por questões de confidencialidade não poderei referir o nome, pela disponibilização dos dados históricos e por todos os esclarecimentos que forneceu, nomeadamente na visita guiada que me proporcionou;

Ainda no que respeita à aplicação real desenvolvida, não posso deixar de referir alguns nomes que, associados ou não à empresa que cedeu a informação, foram muito importantes no entendimento e tratamento da aplicação: o Eng.º Rui, o Dr. Jorge e, de um modo muito especial, o Dr. José Miguel, o Eng.º. Carlos e o Dr. Nuno Gomes, pela incansável ajuda;

Por último, à minha família e aos meus amigos, por ter a certeza de que, haja o que houver, estão sempre *lá*.

A todos, muito obrigada.

Análise e Avaliação de Períodos de Inspeção em Sistemas de Natureza Tecnológica

Resumo

Esta tese enquadra-se no domínio da fiabilidade e manutenção de sistemas e centra-se na análise e avaliação de períodos de inspeção em sistemas de natureza tecnológica.

O projeto desenvolve um modelo analítico que permite determinar o período ótimo de manutenção e o número ótimo de manutenções preventivas até à substituição do sistema. O modelo tem como base uma política de manutenção preventiva periódica e como objetivo a minimização do custo total de manutenção. Na construção do modelo não são assumidos pressupostos que simplifiquem as expressões analíticas consideradas, não restringindo assim o âmbito da sua aplicação.

Além disso, a incerteza de natureza estocástica relacionada com os processos do comportamento (falha, reparação, inspeção, etc.) é modelada por distribuições de probabilidade e a incerteza que se prende com a falta de informação quantitativa, com a escassez de dados, com a falta de conhecimento preciso de alguns parâmetros do modelo é modelada recorrendo à Teoria dos Conjuntos Difusos, o que introduz um acréscimo de realismo ao modelo.

O modelo é aplicado a um sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador, ilustrando a sua adaptabilidade a sistemas tecnológicos reais e destacando as suas potencialidades e limitações.

Analysis and Evaluation of Inspection Periods on Technological Systems

Abstract

This thesis is part of the field of systems reliability and maintenance and focuses on the analysis and evaluation of inspection periods of technological nature systems.

The project develops an analytical model for determining the optimum period of maintenance and the optimal number of preventive maintenances until the system replacement. The model is based on a periodic preventive maintenance policy and aims to minimize the total cost of maintenance. In the model construction phase no assumptions are made to simplify the analytical expressions, thus not constraint its applicability to real systems.

Moreover, the uncertainty of stochastic processes related to behavior (failure, repair, inspection, etc..) is modeled by probability distributions and the uncertainty due to lack of quantitative information, scarcity of data and lack of precise knowledge out some parameters of the model is modeled using the Fuzzy Set Theory, which introduces an increase of realism to the model.

The model is applied to an active power control system of a wind turbine, illustrating its adaptability to real technological systems and highlighting its strengths and weaknesses.

Índice Geral

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	3
1.2 Descrição do sistema	7
1.3 Objetivos	9
1.4 Limitações dos modelos existentes	9
1.5 Estrutura da tese	10
2. Conceitos e Fundamentos de Fiabilidade	13
2.1 Introdução.....	15
2.2 Definições gerais	15
2.3 Principais funções estatísticas em estudos de fiabilidade	16
2.4 Análise da falha	20
2.4.1 Falhas reveladas e não reveladas.....	20
2.4.2 Modos de falha	21
2.4.3 Determinação da causa.....	22
2.4.4 Avaliação do efeito.....	23
2.4.5 Classificação da severidade.....	24
2.5 Sistemas reparáveis	24
2.6 Modelação de sistemas reparáveis	25
2.6.1 Processo de Poisson	25
2.6.2 Processo de renovação	28
2.7 Análise de risco e distribuição de Weibull.....	28
2.8 Manutibilidade e disponibilidade	32
2.9 Síntese	34
3 Políticas e Modelos de Manutenção.....	35
3.1 Introdução.....	37
3.2 Tipos de manutenção.....	39
3.3 Manutenção preventiva	41
3.3.1 Introdução.....	41

3.3.2	Manutenção preventiva – abordagens recentes	42
3.3.3	Manutenção imperfeita.....	43
3.3.4	Modelação de manutenções imperfeitas	46
3.3.5	Medidas de desempenho	50
3.3.6	Custos de manutenção	52
3.4	Manutenção preventiva baseada na idade	53
3.5	Manutenção preventiva periódica	55
3.6	Manutenção preventiva sequencial	57
3.7	Manutenção preventiva condicionada.....	58
3.8	Manutenção preventiva baseada nos custos de manutenção ou no tempo de reparação.....	59
3.9	Manutenção para sistemas com mais do que um componente.....	59
3.10	Síntese	60
4	Modelo de Manutenção de um Sistema Tecnológico.....	63
4.1	Introdução.....	65
4.2	O Modelo.....	68
4.2.1	Descrição da política de manutenção	68
4.2.2	Modelação das falhas do sistema	70
4.2.3	Interação dos modos de falha	72
4.2.4	Número esperado de falhas	74
4.2.5	Fiabilidade do sistema.....	76
4.2.6	Efeitos das atividades de manutenção preventiva	76
4.2.7	Análise do custo da política de manutenção	79
4.3	Aplicação numérica.....	86
4.4	Síntese	90
5	Modelo Probabilístico-Difuso de Manutenção de um Sistema Tecnológico	91
5.1	Introdução.....	93
5.2	Aplicações da teoria dos conjuntos difusos em problemas de manutenção	93
5.3	Propagação da incerteza difusa	99
5.3.1	Princípio da extensão	99

5.3.2	Aritmética intervalar com cortes- α	101
5.3.3	Comparação dos métodos de propagação difusa.....	101
5.4	Análise do custo da política de manutenção	102
5.5	Tomada de decisão difusa	106
5.5.1	Introdução.....	106
5.5.2	Ordenação difusa.....	108
5.5.3	Objetivos, constrangimentos e decisões difusas	109
5.6	Aplicação numérica.....	113
5.6.1	Efeitos da diminuição da incerteza em alguns dos parâmetros difusos do modelo de custos de manutenção	119
5.7	Síntese	123
6	Aplicação dos Modelos Propostos a um Sistema Real.....	125
6.1	Introdução.....	127
6.2	Descrição do aerogerador	128
6.2.1	Controlo de potência	130
6.2.2	Sistema de orientação.....	132
6.2.3	Esforços sobre os aerogeradores	133
6.2.4	Custos de um aerogerador	133
6.2.5	Descrição da política de manutenção do aerogerador	134
6.3	Dados recolhidos	135
6.3.1	Identificação dos principais estados do aerogerador.....	135
6.3.2	Descrição dos principais estados do aerogerador.....	138
6.4	Sistema de controlo de potência ativo	141
6.4.1	Análise dos estados E9 e E11	142
6.4.2	Custos de manutenção do sistema de controlo de potência ativo	145
6.5	Aplicação dos modelos ao sistema de controlo de potência ativo	148
6.5.1	Modelação das ocorrências	149
6.5.2	Análise do período ótimo de manutenção do sistema de controlo ativo de potência.....	153
6.6	Considerações finais.....	163
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	167

Referências	171
Anexos.....	181
Anexo A – Fundamentos da teoria dos conjuntos difusos	183
A.1 Introdução.....	185
A.2 Conjuntos difusos	186
A.2.1 Conceitos básicos	186
A.2.2 Representação de conjuntos difusos.....	189
A.2.3 Operações com conjuntos difusos	193
A.2.4 Construção de conjuntos difusos.....	194
A.2.5 Teoria das possibilidades	197
A.2.6 Lógica difusa	198
A.3 Números difusos.....	199
A.3.1 Conceitos e propriedades	199
A.3.2 Variáveis linguísticas	201
A.3.3 Aritmética difusa	201
A.3.4 Colapso de resultados difusos	205
Anexo B – A energia eólica em Portugal	207
B.1 Energias renováveis.....	209
B.2 Energia eólica	211
B.2.1 Vantagens e desvantagens da energia eólica.....	212
Anexo C – Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11 ...	215
Anexo D – Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E9	225
Anexo E – Tabela com tempo entre ocorrências do Estado E11.....	231
Anexo F – Tabela com tempo entre ocorrências do Estado E9.....	239
Anexo G – Tabela para estimação dos parâmetros de fiabilidade do sistema de controlo de potência (responsável pelo Estado E11).....	243
Anexo H – Tabela para estimação dos parâmetros de fiabilidade do sistema de controlo de carga nas pás (responsável pelo Estado E9).....	245

Índice de Figuras

Figura 2.1	Curva da Banheira: modelo conceptual para o risco de falha	19
Figura 2.2	Efeito do parâmetro de forma na distribuição de Weibull: a) na função densidade de probabilidade; b) na função fiabilidade; c) na função de risco	31
Figura 2.3	Efeito do parâmetro de escala da distribuição de Weibull: a) na função densidade de probabilidade; b) na função fiabilidade; c) na função de risco	32
Figura 3.1	Função de risco para reparação mínima, perfeita e imperfeita	44
Figura 4.1	Exemplo esquemático de um ciclo de funcionamento.	70
Figura 4.2	Exemplo da função de risco do sistema como uma função do tempo, para $T=0.7$ e $\tau=0.1$ unidades de tempo.....	72
Figura 4.3	Exemplos do custo de manutenção, definido na Eq. (4.35), como uma função de T , para diferentes valores de N fixos.	81
Figura 4.4	Custo de manutenção como uma função de T , para diferentes valores de N	87
Figura 5.1	Regras difusas usadas na tomada de decisão das ações de manutenção preventiva (Fonte: Wolkenhauer, 2001)	97
Figura 5.2	Exemplo de uma decisão difusa	112
Figura 5.3	<i>Output</i> difuso C^* , resultantes da aplicação da função custo, admitindo o parâmetro de <i>input</i> τ difuso.....	115
Figura 5.4	Disponibilidade difusa, admitindo o parâmetro de <i>input</i> τ difuso	116
Figura 5.5	Exemplo de conjunto difuso representativo de um valor mínimo de disponibilidade requerido	116
Figura 5.6	Exemplo de uma decisão difusa relativamente à disponibilidade.....	116
Figura 5.7	<i>Outputs</i> difusos, T e C , resultantes da aplicação da função custo, admitindo os parâmetros de <i>input</i> rígidos e difusos.....	118
Figura 5.8	<i>Output</i> difuso C e <i>output</i> difuso C , admitindo uma redução na incerteza de p , de a e de τ	122
Figura 6.1	Imagens de aerogeradores: (a) com rotor de eixo vertical; e (b) com rotor de eixo horizontal	129
Figura 6.2	Exemplificação do controlo de potência ativo	132

Figura 6.3	Frequência média dos onze estados mais frequentes, por máquina, em dois anos	136
Figura 6.4	Tempo médio (em dias) de permanência em cada um dos onze estados com maior tempo de permanência, por máquina, em dois anos.....	138
Figura 6.5	Frequência dos estados E11 e E9, por máquina, em dois anos	142
Figura 6.6	Curva de potência em função da velocidade do vento	145
Figura 6.7	Gráficos de Weibull dos valores da tabela do Anexo G relativos ao estado E11	150
Figura 6.8	Gráficos de Weibull dos valores da tabela do Anexo H relativos ao estado E9	152
Figura 6.9	Gráfico da função custo de manutenção, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 independentes	156
Figura 6.10	Gráfico da função custo, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 dependentes ($a=1.004$).....	157
Figura 6.11	Gráfico das funções custo, para $N=98$, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 independentes para diferentes valores de a	158
Figura 6.12	<i>Outputs</i> difusos, C e T , resultantes da aplicação da função custo da Eq. (6.7) admitindo os valores dos parâmetros da Tabela 6.8	161
Figura 6.13	<i>Outputs</i> difusos, C e T , resultantes da aplicação da função custo expressa na Eq. (6.8), admitindo os valores dos parâmetros da Tabela 6.10.....	163
Figura A.1	Exemplos de uma funções de pertença ((a) triangular, (b) de Gauss e (c) exponencial) que podem ser usadas para caracterizar a proposição "velocidade do vento ronda 25m/s"	187
Figura A.2	Temperatura no intervalo $[0, 52]$ concebidas como: (a) uma variável difusa; (b) uma variável rígida	193
Figura A.3	Exemplos de números difusos expressando a proposição "a velocidade do vento ronda os 25m/s". (a) número difuso triangular; (b) número difuso trapezoidal	200
Figura A.4	Ilustração do princípio da extensão com f contínuo	202

Figura A.5	Exemplos de “desfuzzificação”: (a) método dos máximos das funções de pertença; (b) método do centro de gravidade; e (c) método da média dos máximos das funções de pertença.....	206
Figura B.1	Capacidade geradora de base eólica – Europa, dezembro 2010.....	211

Índice de Tabelas

Tabela 2.1	Mecanismos, modos e efeitos de falha (Fonte: Ebeling, 1997)	23
Tabela 3.1	Quadro resumo da classificação dos níveis de manutenção definidos pela norma NF X60-010.....	46
Tabela 3.2	Síntese das principais políticas de manutenção.....	61
Tabela 4.1	Política ótima e custo de manutenção mínimo para diferentes valores de c_u , considerando $a=1.05$ e $a=1.2$, e $p=0.5$ e $p=0.9$	88
Tabela 4.2	Política ótima e custo de manutenção mínimo para diferentes valores de c_r , considerando $a=1.05$ e $a=1.2$, e $p=0.5$ e $p=0.9$	89
Tabela 5.1	<i>Output</i> difuso C , pelo princípio da extensão, considerando os parâmetros referentes aos custos, a τ , a p , e a a difusos	106
Tabela 5.2	Política ótima e custo ótimo de manutenção, para: i) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e ii) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos, exceto τ que se considera difuso	114
Tabela 5.3	Política ótima e custo ótimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e ii) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e difusos	117
Tabela 5.4	Colapso do <i>output</i> T^* da Tabela 6.3, pela Eq. (5.9), para diferentes valores de δ	118
Tabela 5.5	Disponibilidade difusa, considerando os valores do colapso do <i>output</i> T^* , obtidos na Tabela 5.4, para diferentes valores de δ	119
Tabela 5.6	Política ótima e custo ótimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e ii) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de p	120
Tabela 5.7	Política ótima e custo mínimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e ii) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de a	121
Tabela 5.8	Política ótima e custo mínimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e ii) valores dos parâmetros <i>input</i> rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de τ	122
Tabela 6.1	Exemplo da estrutura do registo dos dados	135
Tabela 6.2	Listagem dos onze estados mais frequentes	136

Tabela 6.3	Listagem dos onze estados com maior tempo de permanência.....	137
Tabela 6.4	Descrição sucinta do estado E11 nas 21 máquinas nos anos 2009 e 2010.....	143
Tabela 6.5	Descrição sucinta do estado E9 nas 21 máquinas nos anos 2009 e 2010.....	144
Tabela 6.6	Estimativa de <i>inputs</i> para parâmetros rígidos	155
Tabela 6.7	Estimativa para <i>outputs</i> rígidos considerando os parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e diferentes valores de <i>a</i>	158
Tabela 6.8	Estimativa para c_p difuso e restantes parâmetros rígidos	159
Tabela 6.9	Estimativa para <i>outputs</i> difusos considerando c_p difuso e restantes parâmetros rígidos	160
Tabela 6.10	Estimativa para a , τ , c_p , c_u e c_r difusos e restantes parâmetros rígidos	162
Tabela 6.11	Estimativa para <i>outputs</i> difusos considerando a , τ , c_p , c_u e c_r difusos e restantes parâmetros rígidos	162
Tabela B.1	Fontes de energia renovável: vantagens e desvantagens.....	210
Tabela B.2	Capacidade geradora e número de aerogeradores em Portugal – dezembro 2010	212

1. Introdução

O Capítulo 1 expõe o contexto e interesse da elaboração da presente tese, anunciando os seus principais objetivos e contribuições. Apresenta também a sua organização, descrevendo sucintamente os capítulos que a compõem.

1.1 Enquadramento

Nos dias que correm, num mundo industrializado e cada vez mais competitivo, tem-se vindo a acentuar a dependência, quer das organizações quer dos indivíduos, em relação aos serviços a estes proporcionados por sistemas tecnológicos cada vez mais sofisticados. Neste contexto, a Engenharia da Fiabilidade tem vindo a desempenhar um papel muito importante na conceção de produtos e sistemas mais fiáveis e seguros. As suas aplicações são múltiplas e o seu campo de interesse não reconhece praticamente limites, pois a necessidade de conhecer o grau de confiança que se pode depositar num determinado produto, sistema ou organização, é universal e genérico. Cada cidadão estima e avalia a fiabilidade dos aparelhos que adquire (televisor, lâmpadas, automóvel); cada industrial procura lançar no mercado produtos de elevada fiabilidade, de modo a cativar a confiança dos clientes; cada entidade prestadora de serviço receia insuficiências de fiabilidade, e conseqüente indisponibilidade, que possam conduzir a desprestígios, nomeadamente nos setores de transportes, redes elétricas e telecomunicações.

A confiança que se deposita no bom funcionamento de um sistema tornou-se, assim, num propósito fundamental e num fator competitivo para as empresas. Esta confiança assenta em grande medida na incorporação de fatores RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) durante o ciclo de vida desse sistema.

Do ponto de vista operativo, a fase mais relevante do ciclo de vida de um sistema de natureza tecnológica é a fase de operação e manutenção e, para muitos sistemas, é esta também a fase que contribui com a maior parcela do Custo de Ciclo de Vida (LCC – Life Cycle Cost).

Num passado não muito distante, a manutenção foi considerada um “mal necessário” da função produtiva. Hoje, no entanto, reconhece-se na manutenção uma das áreas mais importantes e atuantes da atividade industrial, através do seu contributo para o bom desempenho produtivo, a segurança, a qualidade do produto, a imagem da empresa, a rentabilidade económica do processo produtivo, a preservação dos investimentos e as boas relações interpessoais, nomeadamente as boas relações interdepartamentais ou interempresariais, como sejam as relações entre fornecedores e clientes. Este

reconhecimento é adicionalmente reforçado pelas crescentes exigências das normas da qualidade no que diz respeito à manutenção de equipamentos produtivos.

Qualquer sistema tecnológico está sujeito a um processo de deterioração. Para que uma instalação assegure a função para que foi concebida é necessário que os seus equipamentos, máquinas e infraestruturas de suporte sejam mantidas em boas condições de funcionamento. Isso requer que sejam efetuadas reparações às máquinas, inspeções e rotinas preventivas, substituição de peças, lubrificações, limpezas, etc., isto é, um conjunto de ações a que se chama *manutenção*. Qualquer ação de manutenção num processo produtivo, seja corretiva ou preventiva, procura assegurar o funcionamento adequado e a máxima disponibilidade dos equipamentos, mas são as ações de manutenção preventiva, em particular, que aumentam o controlo sobre os equipamentos, evitando avarias imprevistas. Contudo, para o perfeito funcionamento de um equipamento seria necessário inspecioná-lo “continuamente”, o que seria, à partida, insustentável do ponto de vista económico. Em contrapartida, se o intervalo entre inspeções fosse demasiado prolongado, isso poderia conduzir o sistema para um estado de funcionamento degradado, diminuindo assim o seu desempenho e gerando a produção de bens ou serviços não conformes. Numa situação extrema, poderia ainda originar uma avaria de carácter irreversível, porventura com consequências económicas desastrosas.

Neste sentido, é fundamental que os objetivos da manutenção industrial estejam alinhados com os objetivos globais da empresa, já que a manutenção afeta a rentabilidade do processo produtivo, tanto pela sua influência no volume e qualidade da produção, como também pelo seu custo. Efetivamente, se por um lado, a manutenção pode melhorar o desempenho e a disponibilidade de um equipamento, por outro, tem implicações nos custos de operação e manutenção. É, portanto, primordial que se encontre o equilíbrio entre proveitos e custos, de modo a maximizar o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade da empresa.

Esta problemática tem sido objeto de particular atenção nas últimas décadas, tendo os investigadores proposto vários modelos para encontrar uma política de manutenção ótima para um determinado equipamento, partindo do pressuposto de que se conhece a sua fiabilidade e os custos associados às avarias e às ações de manutenção. Porém, a

aplicabilidade destes modelos é reduzida em contextos reais, uma vez que os pressupostos atrás referidos raramente se verificam na prática. A esta limitação acresce o facto de em muitos contextos reais a informação existente ser limitada ou ambígua, o que conduz a um contexto de incerteza.

As causas da incerteza influenciam o tipo de informação associada ao modelo usado no tratamento dessa mesma incerteza para traduzir o sistema físico sob consideração. Zimmermann (1998) aponta como maiores causas de incerteza cenários onde exista: i) falta de informação; ii) excesso de informação; iii) ambiguidade; iv) provas em conflito, isto é, informação contraditória em diversas fontes; e v) medições e crença, ou seja, informação controversa para os diferentes intervenientes no processo.

Modelar a incerteza através de distribuições de probabilidade tem sido o principal meio para a incorporação, de forma explícita, da informação que não é completamente conhecida na fase de construção dos modelos. No entanto, a representação de todas as formas de incerteza através de distribuições de probabilidades não é geralmente adequada, principalmente se a informação disponível não é suficiente.

Na realidade, a maioria dos problemas do mundo real não podem ser modelados deterministicamente, razão pela qual, nos últimos anos, tem-se assistido a um crescimento do interesse do tratamento da incerteza em modelos matemáticos. Segundo Barrico (2009), a pertinência destes modelos prende-se essencialmente com:

- i) a natural incerteza das previsões;
- ii) a impossibilidade de medir os conceitos do mundo real com a precisão exigida pelos modelos matemáticos;
- iii) a impossibilidade de implementar uma solução com a precisão obtida através dos modelos matemáticos;
- iv) a natural e constante alteração do mundo real onde a solução é implementada;
- v) o facto de as funções objetivo serem apenas traduções aproximadas dos objetivos do mundo real.

Oberkampff *et al.* (2004) classificaram a incerteza em dois tipos: *aleatória* e *epistémica*. A incerteza aleatória descreve a variação inerente ao sistema físico ou ambiente em análise e é, normalmente, proveniente da natureza aleatória dos dados associados ao problema, podendo ser representada matematicamente por uma distribuição de probabilidades, desde que existam dados experimentais suficientes. A incerteza epistémica está associada a um certo nível de ignorância ou informação incompleta do sistema ou do ambiente envolvente. É usada para descrever qualquer falta de conhecimento ou informação numa qualquer fase ou atividade do processo de modelação do sistema.

Tratar a incerteza inclui a formulação de modelos matemáticos que a incorporem e o desenvolvimento de métodos de solução adequados. Apesar de não existir um modelo único capaz de incorporar qualquer tipo de incerteza, o modelo escolhido tem que ser adequado, quer ao tipo de incerteza, quer à quantidade e qualidade da informação disponível. De entre os modelos mais usados para tratar a incerteza, apresentados por Zimmermann (1998), destacam-se: o *modelo probabilístico* e o *modelo difuso*.

O modelo probabilístico é geralmente usado quando existe muita informação acerca do problema, resultante de análises estatísticas ou proporcionais. A situação mais frequente consiste em ter distribuições independentes dos dados incertos associados ao problema. Cada dado incerto tem vários valores possíveis, os quais são independentes dos valores dos restantes dados. Se a probabilidade de cada valor de um dado incerto for conhecida, então diz-se que este dado é caracterizado por uma distribuição de probabilidade. Cada dado pode ter um número finito ou infinito de valores, resultando numa distribuição discreta ou contínua, respetivamente.

O modelo difuso – aquele que modela o problema com recurso aos conjuntos difusos – é geralmente usado quando não existe informação estatística disponível ou quando se está a tratar de descrições qualitativas correspondentes a juízos de peritos acerca dos dados ou do impacto das alternativas. Enquanto no modelo clássico, a relação entre um objeto e um conjunto é de pertença ou não pertença, no modelo difuso um objeto pode também pertencer parcialmente a um conjunto, existindo um grau de pertença nesta relação. A Teoria dos Conjuntos Difusos, apresentada pela primeira vez por Zadeh (1965), é uma extensão à teoria clássica dos conjuntos, em que o grau de pertença de um

elemento a um conjunto toma um valor no intervalo $[0, 1]$, em vez de 0 ou 1. Um conjunto difuso é uma classe de objetos em que não existe uma fronteira bem definida entre os objetos que pertencem à classe e os que não pertencem. São reconhecidas as potencialidades desta teoria para modelar a incerteza em situações de grande complexidade ou de escassez de dados, como acontece frequentemente em estudos de fiabilidade onde os parâmetros, tais como as taxas de avarias, os tempos de recuperação, etc., não são conhecidos com exatidão.

Sobressai do referido acima que os parâmetros da fiabilidade são grandezas em relação às quais se tem bastante incerteza. A esta incerteza junta-se a que advém da variabilidade da procura dos produtos ou serviços oferecidos pelos sistemas em geral, tornando complexa a tarefa de prever as consequências das falhas destes sistemas, nomeadamente em termos de custos e de qualidade de serviço. Devido à natureza difusa da incerteza associada a vários destes parâmetros, é conceptualmente mais adequado representá-los através de números difusos resultantes da combinação de muitos fatores, alguns deles de carácter subjetivo. Apesar disso, os estudos de fiabilidade de sistemas com parâmetros difusos, mantendo as características probabilísticas dos processos do comportamento (processos de falha, processos de reparação, processos de reconfiguração, etc.), são ainda em número bastante reduzido.

1.2 Descrição do sistema

O sistema tecnológico, por enquanto referido de modo genérico, considera dois modos de falha dependentes, sendo essa dependência expressa em termos das funções de risco que, pelo facto de serem crescentes, exprimem a degradação gradual do sistema. A natureza dos dois modos de falha conduz a que o modelo possa também ser aplicado a um sistema com componentes estruturados em série, como é possível verificar na Secção 4.2.5, do Capítulo 4.

Os dois modos de falha que ocorrem no sistema podem ser, ou não, imediatamente detetados. As falhas que são reveladas no momento da sua ocorrência são submetidas a uma reparação. Para detetar falhas que não foram reveladas e para prevenir falhas iminentes, são realizadas inspeções e manutenções preventivas periodicamente, sendo

que estas últimas ações são “imperfeitas”, na medida em que, embora melhorem a condição do sistema, não o repõem numa condição equivalente a novo.

No caso em que as falhas são não reveladas, reconhecem-se custos associados ao tempo que decorre até à sua deteção (através de inspeção). Embora sejam de difícil estimativa, estes custos podem incorporar a redução da velocidade da produção, ou até mesmo perdas ou não-conformidades, custos por perda de produtividade, taxas de custo adicionais de não cumprimento de prazos de entrega, perdas de materiais e matéria-prima, etc..

Adicionalmente, neste trabalho as ações de manutenção preventiva não são instantâneas. Na maior parte da literatura existente, no entanto, os tempos de manutenção são frequentemente ignorados quando se pretende determinar uma política de manutenção ótima, tal como em Sheu *et al.* (2006), Badía *et al.* (2002) e Lin *et al.* (2001). Por se entender que este pressuposto pode criar resultados irrealistas, considera-se aqui que as ações de manutenção preventiva levadas a cabo, bem como a substituição total do sistema, são não instantâneas. As inspeções e manutenções preventivas ocorrem a intervalos de tempo periódicos e o sistema é totalmente substituído findo um determinado número de inspeções e manutenções preventivas.

Assume-se custos relativos a inspeções e manutenções preventivas, reparações mínimas, substituições, bem como custos associados a não deteções imediatas das falhas e a indisponibilidades do sistema.

Este trabalho desenvolve assim um modelo na ótica de uma política de manutenção preventiva imperfeita periódica para um sistema tecnológico. O objetivo da aplicação do modelo desenvolvido passa pela determinação dos instantes ótimos para inspeção e manutenção preventiva e, simultaneamente, pela determinação do número ótimo de inspeções e manutenções preventivas até à substituição completa do sistema, com vista à minimização do custo total de manutenção por unidade de tempo.

O modelo assim definido revela-se genérico, podendo nesta perspetiva representar qualquer sistema tecnológico complexo com dois modos de falha que sofra desgaste ou degradação com a idade. Em particular, e considerando o interesse e pertinência do setor, quer para a economia quer para o ambiente, o modelo pode, por exemplo, ser

implementado a um sistema de produção de energia elétrica. O Capítulo 6 faz, precisamente, a aplicação do modelo probabilístico-difuso desenvolvido a um aerogerador. Construído com sofisticada tecnologia elétrica e mecânica, a informação disponível acerca dos aerogeradores no que respeita à manutenção, e em especial aos custos de manutenção, é vaga ou inexistente. Essa informação encontra-se, maioritária e quase exclusivamente, com os fabricantes destas máquinas, sendo objeto de confidencialidade.

1.3 Objetivos

Com o desenvolvimento deste projeto procura-se atingir três objetivos gerais:

1. Desenvolver os fundamentos teóricos e metodológicos relativos à análise e avaliação de períodos de inspeção de sistemas complexos. Em particular, pretende-se desenvolver um modelo que permita, de forma sistemática e eficaz, a determinação de períodos de inspeção ótimos para sistemas complexos descritos por processos estocásticos, tendo em vista: i) a otimização dos custos operacionais na fase de operação e manutenção; ii) a melhoria da fiabilidade; e iii) a obtenção de um dado valor mínimo de disponibilidade do sistema.
2. Estender e validar o modelo desenvolvido, considerando a incerteza que é inerente aos parâmetros considerados.
3. Aplicar o modelo a um sistema de engenharia, na ótica do apoio à tomada de decisão e à definição de políticas de intervenção, nomeadamente nos planos de reconfiguração, manutenção e substituição. Avaliar o desempenho e interesse prático dessa aplicação.

1.4 Limitações dos modelos existentes

Diversos modelos de manutenção foram criados nas últimas décadas. No entanto, apesar de ser um pressuposto não realista, a maior parte deles considera ações manutenção mínimas (após as quais o sistema permanece na condição que tinha imediatamente antes da ação de manutenção) e/ou perfeitas (após as quais o sistema se apresenta como novo). Outro pressuposto frequentemente assumido é a instantaneidade das ações de manutenção. Num mundo industrializado e cada vez mais competitivo, é por vezes

necessário, outras vezes até obrigatório, a paragem de funcionamento do sistema para dar lugar a ações de manutenção. Estas simplificações são assumidas por diversos autores, na medida em que a formulação do problema de decisão sob tais constrangimentos facilita em larga medida o manuseamento matemático das expressões. Também com o objetivo de garantir uma menor complexidade no modelo matemático, muitos autores consideram que, a haver diferentes modos de falha, eles se processam sem que haja qualquer relação de dependência entre eles, o que, em sistemas tecnológicos sofisticados, parece ser muito pouco realista.

Por último, dado também o acréscimo de complexidade resultante da incorporação da incerteza na construção de modelos de manutenção, nos modelos existentes ela é raramente contemplada.

Neste contexto, este trabalho desenvolve um modelo de manutenção que visa a minimização do custo total de manutenção por unidade de tempo para um sistema tecnológico, no sentido de colmatar muitas das lacunas encontradas na literatura.

1.5 Estrutura da tese

Esta tese está organizada em sete capítulos, sendo o primeiro constituído por esta introdução. Aqui, apresentam-se as motivações que estiveram na origem deste projeto e o contexto no qual se desenvolve, os objetivos gerais, bem como a forma como o documento se encontra estruturado.

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos e fundamentos de Fiabilidade. Essencialmente, são abordados conceitos relacionados com este tema que, de alguma forma, estão associados aos objetivos do trabalho, como sejam, por exemplo, os diferentes modos de modelar as falhas de um sistema reparável.

No Capítulo 3 pode ser encontrada uma descrição/sistematização das políticas e modelos de manutenção que mais se destacam na literatura, apontando vantagens e desvantagens da adoção de cada uma, de acordo com a sua especificidade. Para uma melhor compreensão destas políticas, apresenta-se também neste capítulo um estudo prévio, no qual se identifica um conjunto de conceitos e abordagens importantes relacionadas com a manutenção.

O Capítulo 4 assume na tese um papel central. Nele são desenvolvidos os fundamentos teóricos e metodológicos relativos à análise e avaliação de períodos de inspeção de sistemas complexos (primeiro objetivo da tese). Em particular, desenvolve-se um modelo que permite, de forma sistemática e eficaz, a determinação de períodos de inspeção ótimos de sistemas complexos descritos por processos estocásticos. O modelo é orientado segundo as seguintes perspetivas: i) a otimização dos custos operacionais na fase de operação e manutenção e ii) a melhoria da fiabilidade com as ações de manutenção.

O Capítulo 5 pode ser visto como uma extensão do estudo apresentado no capítulo anterior. Neste sentido, o sistema é analisado numa perspetiva mais abrangente que considera a incerteza dos parâmetros no modelo de manutenção. Esta incerteza é modelada por conjuntos difusos. Como consequência da propagação desta incerteza através dos modelos analíticos, os resultados obtidos, nomeadamente o custo de manutenção, são também conjuntos difusos. Por razões que se prendem, essencialmente, com a simplicidade de representação serão maioritariamente utilizados os números difusos triangulares para modelar a incerteza dos parâmetros, sem que daí resulte qualquer perda de generalidade na abordagem feita.

Tendo como base de trabalho os capítulos 4 e 5, no Capítulo 6 mostra-se uma aplicação real do modelo probabilístico-difuso de manutenção proposto. O sistema em estudo consiste no sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador de 2 MW de potência, instalado em parques eólicos de todo o mundo. Para o efeito, foram analisados os aerogeradores de 2 MW de uma mesma marca, que possuem este sistema de controlo ativo de potência, de um parque eólico português. O capítulo começa por fazer uma apresentação geral do funcionamento de um aerogerador, detalhando as características de funcionamento do aerogerador objeto de estudo, descrevendo exaustivamente os seus principais estados, bem como a política de manutenção aplicada no parque eólico. Seguidamente, o modelo probabilístico-difuso de manutenção, proposto no Capítulo 5, é aplicado a este caso real, analisando e comparando os seus resultados com a política de manutenção a vigorar na empresa.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões deste projeto, delineando algumas perspetivas e sugestões de investigação futuras.

2. Conceitos e Fundamentos de Fiabilidade

Neste capítulo são apresentados os conceitos de Fiabilidade, cujo conhecimento é fundamental para o desenvolvimento do modelo de manutenção (objeto do Capítulo 4), assim como para uma melhor compreensão dos modelos de manutenção existentes na literatura (objeto do capítulo seguinte).

2.1 Introdução

A Teoria da Fiabilidade, um dos ramos de aplicação das Probabilidades e da Estatística, foi descrita como a ciência da predição, da estimação e da otimização da probabilidade do tempo de vida de produtos e equipamentos industriais (Guerra, 1977). Uma das questões fundamentais quando se analisa o tempo de vida T de um componente é a determinação da probabilidade de o mesmo falhar num determinado intervalo de tempo $]t, t+\Delta t]$, sabendo que estava a trabalhar corretamente no instante t . Note-se que não é imperativo que a variável T represente diretamente a dimensão tempo. Em casos especiais, torna-se mais significativo avaliar a fiabilidade em função de outras grandezas. A fiabilidade de um automóvel, por exemplo, pode ser expressa em função dos quilómetros percorridos, a fiabilidade de um interruptor em função do número de ciclos ON/OFF, a fiabilidade de um motor elétrico em função do número de ciclos de rotação, etc..

Neste contexto, também o termo *avaria* não deve ser entendido literalmente. Um engarrafamento de trânsito ou a falta de combustível são exemplos de avarias, quando se estuda a fiabilidade das redes de transporte ou, em particular, os horários de uma empresa de transportes. Embora neste trabalho *avaria* se refira exclusivamente a disfunções tecnológicas, não se deve perder de vista este significado mais abrangente, o qual permite, sem dúvida, transpor para outros domínios as conquistas da Fiabilidade.

2.2 Definições gerais

Admita-se o interesse na análise do tempo de vida, ou de pleno funcionamento, de um determinado bem¹ e sobre o qual é exercido um qualquer tipo de esforço. Desde que considerado individualmente, qualquer sinónimo de *bem* é, doravante, usado indistintamente na redação do texto. Este bem, aqui referido de um modo genérico, pode ser uma viga sujeita a uma carga, um fusível instalado num circuito, uma asa de um avião sujeita à ação de várias forças ou um dispositivo eletrónico colocado em

¹Qualquer elemento, componente, aparelho, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que pode ser considerado individualmente. Um conjunto de bens pode, ele próprio, ser considerado como um bem. (NP EN 13306)

funcionamento. Suponha-se que possa ser definido, para qualquer um desses bens, um estado, que será denotado por “falha”, no qual o bem não cumpre a sua missão. Assim, a viga pode romper ou quebrar, o fusível pode fundir, a asa pode empenar ou o dispositivo pode deixar de funcionar adequadamente. Se esse bem for colocado em funcionamento sob condições de esforço num determinado instante, tome-se $t=0$, e observado até que falhe, isto é, que deixe de cumprir a sua função sob o esforço aplicado, a duração de vida T pode ser considerada uma variável aleatória contínua com uma determinada função densidade de probabilidade $f(t)$ (função distribuição $F(t)$).

2.3 Principais funções estatísticas em estudos de fiabilidade

Função Distribuição

A função distribuição de T , $F(t)=P(T \leq t)$, $t \geq 0$, é definida como a probabilidade de que um componente falhe até ao instante t .

$F(t)$ pode, ainda, ser interpretada como a proporção de componentes da população que falham até ao instante t .

Função Densidade de Probabilidade

A função densidade de probabilidade, $f(t)$, para uma variável aleatória contínua T , é definida como a derivada da função distribuição, $F(t)$, isto é,

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad t \geq 0 \quad (2.1)$$

A função densidade de probabilidade pode ser usada para representar a frequência relativa dos tempos de falha como uma função do tempo. No entanto, para aplicações em fiabilidade, a função densidade de probabilidade é menos importante do que outras funções (como, por exemplo, a função de risco e a função fiabilidade), sendo, contudo, usada no desenvolvimento de resultados teóricos.

O significado de fiabilidade é assim refletido, frequentemente, por duas funções, a *função fiabilidade*, $R(t)$, e a taxa de falhas instantânea, por vezes denominada por *função de risco*, $r(t)$.

Função Fiabilidade

A fiabilidade de um bem no instante t , $R(t)$, é definida por

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t), \quad t \geq 0 \quad (2.2)$$

Na maior parte das aplicações, a função fiabilidade assume um papel fundamental, uma vez que indica a probabilidade de um bem continuar a funcionar para além do instante t ou, de outro modo, a probabilidade de que o bem não venha a falhar durante o intervalo de tempo $[0, t]$. Em aplicações biomédicas, o termo “função de sobrevivência” é também usado.

Função de Risco

A função de risco ou função taxa de falhas instantânea, $r(t)$, associada à variável aleatória T , é definida por

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad t \geq 0 \quad (2.3)$$

Para pequenos intervalos de tempo Δt , a função de risco, $r(t)$, expressa a tendência de um componente falhar no intervalo de tempo $]t, t + \Delta t]$, dado que não falhou até ao instante t . Deste modo, tem-se:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \cong r(t)\Delta t, \quad t \geq 0 \quad (2.4)$$

A função fiabilidade, a função distribuição e a função densidade de probabilidade, respetivamente, podem ainda ser expressas em função de $r(t)$ como:

$$R(t) = e^{-\int_0^t r(x)dx}, \quad t \geq 0 \quad (2.5)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t r(x)dx}, \quad t \geq 0 \quad (2.6)$$

$$f(t) = r(t)e^{-\int_0^t r(x)dx}, \quad t \geq 0 \quad (2.7)$$

Na maioria dos modelos existentes torna-se muito mais informativo estudar as propriedades da função de risco, do que caracterizar o modelo em termos de uma função densidade de probabilidade ou de uma função distribuição. Algumas das propriedades mais importantes da função de risco são apresentadas seguidamente.

Propriedade 2.1

Uma função $r(t)$ é uma função de risco se e só se satisfaz as seguintes propriedades:

$$\text{i) } r(t) \geq 0 \quad (2.8)$$

$$\text{ii) } \int_0^{+\infty} r(t) dt = +\infty \quad (2.9)$$

A monotonia da função de risco é, também, uma propriedade relevante.

Propriedade 2.2

i) Se $r(t)$ é uma função de risco tal que

$$t_1 \leq t_2 \Rightarrow r(t_1) \leq r(t_2) \quad (2.10)$$

então diz-se que o correspondente modelo tem uma taxa de risco crescente.

ii) Se $r(t)$ é uma função de risco tal que

$$t_1 \leq t_2 \Rightarrow r(t_1) \geq r(t_2) \quad (2.11)$$

então diz-se que o correspondente modelo tem uma taxa de risco decrescente.

A função de risco crescente é retratada quando, por exemplo, um bem sofre desgaste ao longo do tempo. Já a função de risco decrescente deve ser interpretada como um aperfeiçoamento do bem com a idade. No entanto, outras explicações podem ser dadas, quando são considerados sistemas com dois ou mais componentes de diferentes tipos.

A denominada Curva da Banheira (Figura 2.1) fornece um modelo conceptual importante para o risco de algumas populações de componentes. Considere-se, então, a variável aleatória T , que representa o tempo até à primeira falha de determinado

componente, o qual foi projetado para durar um certo número de unidades de tempo, km, ciclos, etc., conforme a sua composição, construção, condições de funcionamento, capacidade e demais características. Esse componente pode, no entanto, falhar precocemente, devido a algum defeito de fabrico/construção ou falha de conceção/projeto, fenómenos que caracterizam ou configuram a primeira fase de um equipamento, designada por *fase infantil* (a). Nestes casos, os problemas são normalmente detetados cedo e eficazmente reparados, pelo que, neste período, a função de risco é decrescente. Quando o componente ultrapassa esta fase inicial, assume-se que não tem imperfeições óbvias e entra, assim, na *fase de vida útil* (b), podendo a função de risco ser aproximadamente constante neste período, uma vez que as possíveis falhas são, à partida, causadas por fatores aleatórios e externos. Quando o desgaste natural do tempo, a “velhice”, se torna a causa dominante da avaria, tem-se, então, uma função de risco crescente - *fase de desgaste* (c).

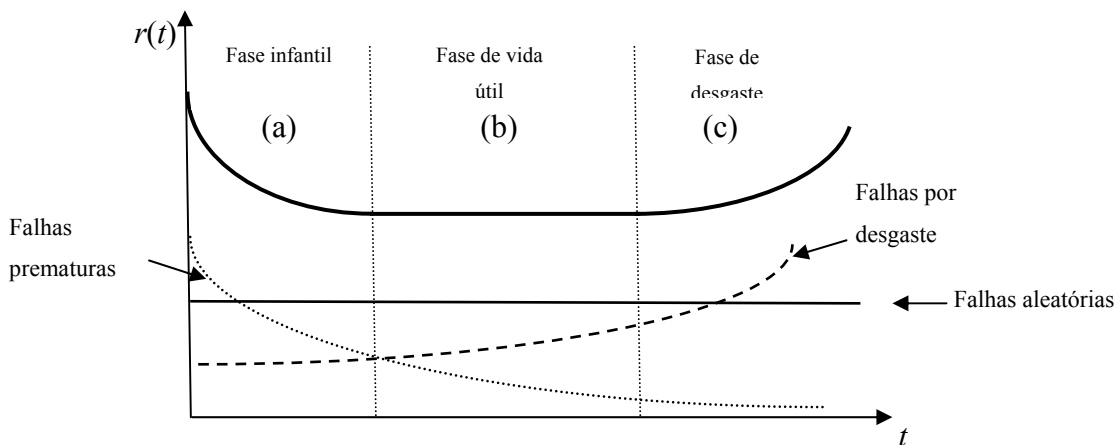


Figura 2.1 Curva da Banheira: modelo conceptual para o risco de falha

Em outras aplicações, a função de risco pode ser interpretada de forma diferente. Contudo, o procedimento descrito é típico de muitos componentes e não deixa de ser curiosa a semelhança existente entre ele e a vida do ser humano. Neste sentido, Guerra (1977) refere que, da mesma forma que se estabelece uma idade média para a população dos diferentes países, pode também definir-se, para cada produto industrial, uma vida média, na proximidade da qual ele perece e tem de ser retirado de serviço. Além disso, também os sofisticados componentes industriais podem sucumbir, de maneira imprevista e aleatória, muito longe da vida média dos componentes seus similares.

2.4 Análise da falha

Para ser possível o planeamento formal da melhoria da fiabilidade de um sistema é estritamente necessário a aquisição de conhecimento sobre os *modos de falha* e a *análise dos efeitos* (FMEA – *failure mode and effect analysis*). Esta metodologia influencia o planeamento, na medida em que, reconhecendo as causas, podem identificar-se os modos de falha, avaliar-se as probabilidades da sua ocorrência e os seus efeitos sobre o sistema e, por fim, determinar-se a melhor ação corretiva ou preventiva em cada caso.

2.4.1 Falhas reveladas e não reveladas

As falhas de um sistema podem ser imediatamente reveladas no momento da sua ocorrência ou, pelo contrário, podem necessitar de algum tipo de teste ou inspeção para serem detetadas (falhas não reveladas). Taghipour e Banjevic (2011) referem que mais de 40% de todas as falhas de um sistema industrial complexo são falhas não reveladas. As falhas não reveladas, ou *falhas latentes* como são designadas na norma NP EN 13306, podem reduzir o desempenho do sistema ou provocar perdas de produção e, apesar de permitirem o funcionamento do sistema, as suas consequências podem ser, por vezes, catastróficas. Equipamentos médicos de ultrassom, por exemplo, possuem disjuntores que protegem os aparelhos de sobrecargas e curto-circuitos. Se estes componentes protetores falham, o sistema pode continuar a sua função principal, apesar do risco elevado no caso de sobrecarga ou de ocorrência de um curto-circuito.

Por outro lado, existem componentes que não têm influência direta no funcionamento do sistema e, nesse sentido, as suas falhas são consideradas falhas não reveladas. Se, por exemplo, um *backup* de um disco externo de um computador falhar, o computador pode ainda funcionar, sem que o seu utilizador tenha tido consciência do acontecimento, aumentando a possibilidade da perda de dados.

Geralmente, para verificar a segurança e o desempenho do sistema e detetar falhas não reveladas, são levadas a cabo inspeções periódicas planeadas. Esta problemática tem vindo a ser estudada por muitos autores, entre os quais se destacam, no passado recente, Badía e Berrade (2009b), Barros *et al.* (2006) e Badía *et al.* (2002).

2.4.2 Modos de falha

Muitos sistemas, subsistemas e componentes têm mais do que uma causa de falha. Em muitas aplicações, e para determinados propósitos, é importante fazer-se a distinção entre essas diferentes causas. As diferentes maneiras pelas quais é verificada a incapacidade de um bem para cumprir a função requerida designam-se “modos de falha”.

O tempo de falha de um sistema com dois ou mais modos de falha pode ser modelado como um sistema em série. Quando um componente falha, o sistema falha. Associado a cada modo de falha de um componente, existe um tempo potencial até à ocorrência da falha. O tempo de falha observado é o mínimo entre todos os tempos individuais.

Taghipour *et al.* (2010) criaram um modelo de otimização de instantes de inspeções periódicas para um sistema reparável complexo. Os autores assumem que as falhas do sistema são classificadas em duas categorias principais, tipo I e tipo II, consoante as suas consequências e possibilidades de deteção. O modo de falha tipo I é aquele que tem uma influência mais significativa no funcionamento do sistema. O modo de falha tipo II é um modo de falha menos crítico para o sistema. Meeker e Escobar (1998) também consideraram dois modos de falha: simples e severas. Estes autores sugerem que o modo de falha simples pode ser assumido quando a degradação (perda gradual de desempenho) excede um determinado nível preestabelecido. O modo de falha severa, por outro lado, causa a paragem imediata do sistema. Nesta perspetiva, pode, de algum modo, associar-se o modo de falha tipo I ao modo falha severo de Meeker e Escobar (1998) e o modo de falha tipo II ao modo de falha simples. Taghipour *et al.* (2010) assumem que os modos de falha tipo II são sempre do tipo não reparável e que são necessárias inspeções ao sistema para a sua deteção.

Também Huynh *et al.* (2011) desenvolveram um estudo que pretende suportar a tomada de decisão, no que respeita a atividades de manutenção, tendo em consideração dois modos de falha dependentes e competitivos: modo de falha devido à degradação e modo de falha devido a eventos de choque traumáticos.

Nos últimos anos, vários autores (por exemplo; Castro, 2008; Zequeira e Berenguer, 2006; e Lin *et al.*, 2001) têm dado particular atenção a dois modos de falha:

maintainable e *non-maintainable*. Em termos práticos, sabe-se que o sistema tem determinadas funções, cuja degradação que conduz à indisponibilidade do sistema pode ser removida através de ações de manutenção preventiva (modo de falha *maintainable*). Por outro lado, remover a degradação proveniente de outras funções do sistema é apenas possível fazendo a substituição completa do sistema, que lhe restituirá a condição de “tão bom como novo”. Normalmente, ações de manutenção preventiva tais como a limpeza, a lubrificação ou mesmo a substituição parcial do sistema podem restabelecer a condição “tão bom como novo” relativamente a alguns modos de falha (*maintainable*). A propensão de falha crescente de outros modos de falha (*non-maintainable*), devido ao desgaste, por exemplo, não é eliminada por ações de manutenção preventiva.

Estes dois modos de falha são discutidos no modelo proposto no Capítulo 4. Por não ter sido encontrada tradução fidedigna para esta nomenclatura, e para facilitar a exposição, daqui em diante, ao longo do documento, os modos de falha *maintainable* e *non-maintainable* serão tratados como *modo de falha tipo I* e *modo de falha tipo II*, respetivamente, como aliás foi feito, usando notação análoga, em Zequeira e Bérenguer (2006).

2.4.3 Determinação da causa

Para cada modo de falha, é feita uma avaliação para determinar a provável causa ou causas. Ebeling (1997) apresenta alguns exemplos de causas possíveis:

- a) *Esforço anormal*: normalmente é externo ou ambiental, mas pode, por exemplo, tratar-se de um aumento de energia interna;
- b) *Esforço mecânico*: vibração continuada pode, por exemplo, despoletar falta de conexões;
- c) *Contaminação*: sujidade pode, por exemplo, causar uma falha elétrica;
- d) *Evaporação*: evaporação molecular de filamentos, por exemplo, pode agravar a idade dos filamentos;
- e) *Fadiga*: alterações físicas do material podem resultar em fratura;
- f) *Fricção*: causa muito comum de falha em correias e engrenagens;

- g) *Ciclos de temperatura*: dilatações e contrações repetidas podem enfraquecer o material;
- h) *Idade ou desgaste*: não é uma causa primária, mas reflete uma exposição prolongada a outras causas;
- i) *Peças com defeito*: refletem um fraco controlo de qualidade durante o fabrico;
- j) *Erro induzido pelo operador* (na manutenção, por exemplo): também chamado “erro humano”;
- k) *Corrosão*: transformação química que enfraquece o material.

2.4.4 Avaliação do efeito

Os efeitos de uma falha podem ser traduzidos na completa falha do sistema, na degradação parcial do sistema ou, simplesmente, podem não ter qualquer repercussão no seu desempenho. É, portanto, essencial que se avalie o impacto que cada falha tem no estado do sistema. Por exemplo, quando uma falha ocorre num componente redundante, o desempenho do sistema não é imediatamente afetado. Contudo, a sua fiabilidade fica reduzida e a sua capacidade de manutenção e segurança podem, também, ficar diminuídas.

A identificação do modo de falha, a determinação da causa e a avaliação do seu efeito estão relacionadas, a título exemplificativo, na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Mecanismos, modos e efeitos de falha (Fonte: Ebeling, 1997)

<i>Mecanismo de falha²</i>	<i>Modo de falha</i>	<i>Efeito da falha</i>
Corrosão	Falha na parede do reservatório	Rutura do tanque
Defeito de fabrico	Vazamento na bateria	Falha da lanterna de iluminação
Vibração excessiva prolongada e fadiga	Quebra de um motor de montagem	Perda de potência do motor e ruído excessivo
Fricção e desgaste excessivo	Correia partida	Paragem da linha de produção
Contaminação (sujidades)	Perda de contacto	Falha no circuito
Evaporação	Filamento partido	Lâmpada queimada
Temperaturas baixas prolongadas	Selos frágeis	Vazamento no sistema hidráulico

² O mecanismo da falha origina o modo da falha, que, por sua vez, se traduz num efeito.

2.4.5 Classificação da severidade

De acordo com a gravidade do efeito da falha, vários graus de severidade podem ser usados. A cada modo de falha é atribuído um determinado nível de severidade a ser usado como uma base para a hierarquização das ações corretivas. A classificação de severidade apresentada por Ebeling (1997) é das mais comuns e coloca as falhas numa das seguintes quatro categorias:

- a) *Catastrófica*: ocorrência de falha significativa no sistema, que pode resultar em perda de vida ou danos graves;
- b) *Crítica*: desempenho inaceitável do sistema;
- c) *Marginal*: sistema degradado, com perda parcial do seu desempenho;
- d) *Negligenciável*: ocorrência de pequenas falhas, que não têm qualquer efeito no desempenho do sistema.

2.5 Sistemas reparáveis

De acordo com a norma NP EN 13306, um sistema diz-se *reparável* quando, depois de uma avaria e sob determinadas condições (económicas, ecológicas, técnicas e/ou outras), pode ser repostado num estado em que poderá desempenhar a função requerida.

Em sistemas reparáveis, a recolha dos históricos de dados permite estimar ou prever parâmetros como (Meeker e Escobar, 1998):

- A distribuição dos tempos entre reparações, $\tau_j = T_j - T_{j-1}$ ($j=1, 2, \dots$), onde $T_0=0$.
- O número acumulado de reparações no intervalo $]0, t]$, como uma função da idade t do sistema.
- O tempo esperado entre falhas, *MTBF* (*Mean Time Between Failures*).
- O número esperado de reparações no intervalo $]0, t]$, como uma função de t .
- A taxa de reparação como uma função de t .
- O custo médio de reparação como uma função de t .

A análise de sistemas reparáveis é objeto deste estudo e, quando se pretende a restituição do funcionamento de um sistema deste género, é necessário recorrer-se a modelos que descrevam essa “reabilitação”. A análise desses modelos é tratada na secção seguinte.

2.6 Modelação de sistemas reparáveis

O propósito de muitos estudos de fiabilidade é o de descrever as tendências e padrões de falha de um sistema. As falhas do sistema são usualmente seguidas de reparações e os dados obtidos consistem numa sequência de tempos de falha e de reparação. Quando, por exemplo, um subsistema inserido num sistema complexo é reparado ou substituído após uma falha, a distribuição do tempo até à próxima falha do sistema depende do seu estado global no instante imediatamente antes da ocorrência da falha do subsistema, bem como da natureza da reparação levada a cabo. Esta situação pode ser descrita através de modelos que reflitam as mudanças no estado do sistema e as dependências entre as falhas ao longo do tempo.

Os modelos estocásticos mais vulgarmente utilizados para a análise de sistemas reparáveis são: os processos de Poisson (homogéneos e não homogéneos), os processos de renovação e os processos que são sobreposições dos processos anteriores.

2.6.1 Processo de Poisson

O processo de Poisson é um modelo paramétrico simples frequentemente usado para a análise de certos tipos de ocorrências. Por exemplo, o número de falhas no anemómetro de um aerogerador, ocorridos durante um determinado período de tempo, pode ser adequadamente modelado através de um processo de Poisson.

Se $N(t)$ representa o número de falhas (renovações ou substituições), $\{N(t), t \geq 0\}$ é um processo de Poisson se satisfaz as seguintes condições:

- $N(0)=0$;
- O número de ocorrências em intervalos de tempo disjuntos são estatisticamente independentes. Um processo com esta propriedade é dito ter “incrementos independentes”;

- A taxa de ocorrência do processo, $\lambda(t)$, é positiva e

$$E[N(t_1, t_2)] = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\alpha) d\alpha < \infty, \quad 0 \leq t_1 < t_2 < \infty \quad (2.12)$$

Um processo de Poisson $N(t_1, t_2)$ tem, então, uma distribuição de Poisson com a seguinte função densidade de probabilidade:

$$\Pr[N(t_1, t_2) = n] = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(\alpha) d\alpha \right]^n}{n!} \exp\left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\alpha) d\alpha \right], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

O integral da taxa de ocorrência do processo, $\lambda(t)$, surge frequentemente em desenvolvimentos analíticos, nomeadamente nas equações. (2.12) e (2.13), e é, muitas vezes, sucintamente denotado por $\Lambda_{t_1}^{t_2}$.

Note-se que, se as ocorrências do processo $\lambda(t)$ forem referentes a falhas, esta “taxa de ocorrência” é vulgarmente designada por *taxa de falhas instantânea* ou *função de risco*, $r(t)$ (Secção 2.3).

2.6.1.1 Processo homogéneo de Poisson (HPP – *Homogeneous Poisson Process*)

Um processo homogéneo de Poisson é um processo de Poisson com uma taxa de ocorrências constante. Seja $\lambda(t)=1/\theta$. Então,

- $N(t_1, t_2)$ tem uma distribuição de Poisson com parâmetro $E[N(t_1, t_2)] = (t_2 - t_1)/\theta$.
- O número esperado de ocorrências em $]t_1, t_2]$ é $E[N(t_1, t_2)]$. Equivalentemente, o número esperado de ocorrências por unidade de tempo em $]t_1, t_2]$ é constante e igual a $1/\theta$.
- Os tempos entre ocorrências, $\tau_j = T_j - T_{j-1}$, são independentes e identicamente distribuídos, cada um com distribuição Exponencial de parâmetro θ . Logo,

$$\Pr[\tau_j > t] = \Pr[N(T_{j-1}, T_{j-1} + t) = 0] = \exp[-t / \theta] \quad (2.14)$$

Isto significa que o tempo médio entre ocorrências num processo homogéneo de Poisson é θ . Se o processo for referente a falhas, poder-se-á falar em *tempo médio entre falhas* ($MTBF = \theta$).

2.6.1.2 Processo não homogéneo de Poisson (NHPP – *Non-Homogeneous Poisson Process*)

Um processo não homogéneo de Poisson é um processo de Poisson com uma taxa de ocorrências não constante, $\lambda(t)$. Neste caso, os tempos entre ocorrências nem são independentes nem identicamente distribuídos e o número esperado de ocorrências é dado por

$$E[N(t_1, t_2)] = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\alpha) d\alpha \quad (2.15)$$

Uma modelação vulgarmente utilizada para as taxas de ocorrência de falhas, em análise de fiabilidade de sistemas reparáveis, é dada pela seguinte equação:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1}, \quad \theta > 0, \quad \beta > 0 \quad (2.16)$$

A Eq. (2.16) advém da suposição de que os tempos entre sucessivas falhas seguem uma função densidade de probabilidade de Weibull, com dois parâmetros θ e β , de escala e de forma, respetivamente. Quando $\beta=1$, este modelo reduz-se a um processo homogéneo de Poisson.

A distribuição de Weibull é muitas vezes usada na modelação de sistemas reparáveis, devido à sua flexibilidade e aplicabilidade (na Secção 2.7 a distribuição de Weibull é analisada mais pormenorizadamente), havendo outras distribuições de interesse para o efeito, das quais se destacam as distribuições Gamma e Log-normal (Ebeling, 1997), por possuírem também características de flexibilidade e de adequação à realidade.

2.6.2 Processo de renovação

Um processo de renovação é um caso mais geral de um processo de Poisson em que os tempos entre duas quaisquer ocorrências sucessivas não seguem necessariamente uma distribuição exponencial.

Um processo de contagem $N(t)$, que representa o número total de ocorrências no intervalo $]0, t]$, é chamado processo de renovação se o tempo entre ocorrências é uma variável aleatória independente e identicamente distribuída.

Note-se que um HPP é um processo de renovação (cujos tempos entre ocorrências seguem uma distribuição exponencial), mas que um NHPP não o é.

As características dos processos de renovação que assumem normalmente interesse incluem (Meeker e Escobar, 1998):

- A distribuição dos valores dos tempos entre ocorrências, τ_j ;
- Consequentemente, os tempos médios entre ocorrências são $E(\tau)$. Mais uma vez, para um processo de renovação de falha, é comum designar-se $E(\tau) = MTBF$;
- A distribuição do tempo até à k -ésima ocorrência do sistema ($k = 1, 2, \dots$);
- O número de ocorrências que serão observadas num futuro intervalo de tempo.

O processo resultante da agregação de renovações de um grupo de n processos de renovação independentes, operando simultaneamente, é conhecido como uma *sobreposição de processos de renovação* e constitui um exemplo de possíveis variações do processo de renovação. A menos que cada processo de renovação constitua individualmente um HPP, a sobreposição de processos de renovação não é um processo de renovação.

2.7 Análise de risco e distribuição de Weibull

O termo *risco*, tal como é usado na Qualidade e na Fiabilidade, é uma generalização do facto de a taxa de falhas de equipamentos variar ao longo do tempo. A análise de risco proporciona um modo de medir uma mudança na taxa de falhas (Locks, 1995). A

distribuição de Weibull (assim chamada desde 1939, após o trabalho publicado pelo cientista sueco Waloddi Weibull) possui uma forma matematicamente conveniente, para fazer inferências acerca da taxa de falhas e do tempo de vida de uma variável, baseada nos valores dos parâmetros obtidos através do histórico de dados.

A distribuição de Weibull de três parâmetros (um parâmetro de escala, um parâmetro de localização e um parâmetro de forma) é uma extensão natural da distribuição exponencial de dois parâmetros (um parâmetro de escala e um parâmetro de localização). Uma das características fundamentais da distribuição exponencial é o facto de ter função de risco constante. Isto significa que se qualquer componente tem tempo de vida com distribuição exponencial, então, qualquer que seja a sua idade, o tempo residual de vida não é afetado pelo tempo já vivido, isto é, o componente “não envelhece”, e se chegou vivo, por exemplo, ao fim de dez anos, o tempo de sobrevivência tem a mesma distribuição que o tempo de vida à nascença, ou seja, tem ainda distribuição exponencial.

Embora a distribuição exponencial seja uma distribuição muito comum no estudo da fiabilidade de alguns tipos de componentes eletrónicos (circuitos robustos de alta qualidade, como por exemplo componentes eletrónicos de um equipamento de computação, têm geralmente falhas causadas por fatores casuais externos), não é uma distribuição apropriada quando se pretende estudar componentes eletrónicos que têm falhas causadas por defeitos de qualidade. Tais defeitos são difíceis de eliminar na totalidade e são a principal causa de problemas de fiabilidade de um sistema eletrónico. A distribuição exponencial é normalmente desapropriada para modelar a vida de componentes mecânicos sujeitos a alguma combinação de fadiga, corrosão ou desgaste. É, também, desapropriada para componentes eletrónicos que apresentem propriedades de desgaste inerentes à sua atividade tecnológica (como, por exemplo, lasers ou instrumentos que contêm fibras). Uma distribuição com uma função de risco crescente é, nestas aplicações, muito mais adequada.

Já a distribuição de Weibull permite expressar matematicamente uma grande variedade de tipos de risco. A taxa de falhas pode ser continuamente crescente, continuamente decrescente ou constante. Grandes alterações nos padrões de risco, em diferentes

períodos do tempo de vida, podem ser determinados por uma diferente distribuição de Weibull para cada período, como é exemplo a chamada *curva da banheira* (Figura 2.1).

Por esta razão, a distribuição de Weibull é a distribuição de probabilidade mais usada na fiabilidade, sendo caracterizada pela função de risco com a forma:

$$r(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-n}{\theta} \right)^{\beta-1}, \quad \theta > 0, \quad \beta > 0, \quad n \geq 0, \quad t \geq n \quad (2.17)$$

onde θ é o parâmetro de escala, β o parâmetro de forma e n o parâmetro de localização da distribuição.

Esta função $r(t)$ é crescente para $\theta > 0$ e $\beta > 1$ e é decrescente para $\theta > 0$ e $\beta < 1$.

Pela Eq. (2.5),

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \frac{\beta}{\theta^\beta} (t-n)^{\beta-1} dt \right] = e^{-\left(\frac{t-n}{\theta}\right)^\beta} \quad (2.18)$$

e, pela Eq. (2.7),

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-n}{\theta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-n}{\theta}\right)^\beta} \quad (2.19)$$

As figuras seguintes analisam as funções definidas em (2.17), (2.18) e (2.19). Para facilitar a interpretação, e sem qualquer perda de generalidade, considere-se o parâmetro de localização igual a zero, isto é, considere-se $n=0$, reduzindo assim a distribuição de Weibull de três parâmetros à distribuição de Weibull de dois parâmetros.

O parâmetro de forma é β e o seu efeito pode ser visto na Figura 2.2 para diferentes valores.

Para $\beta < 1$, a forma da função densidade de probabilidade é semelhante à forma da função densidade de probabilidade exponencial. Para valores de $\beta > 3$, a função densidade de probabilidade é praticamente simétrica, assemelhando-se à distribuição normal. Para $1 < \beta < 3$, a função densidade de probabilidade é enviesada (Figura 2.2 a)).

Quando $\beta = 1$, $r(t)$ é uma constante e a distribuição é igual à exponencial com parâmetro $1/\theta$. A função de risco pode, ainda, ser crescente ou decrescente, dependendo do valor do parâmetro de forma, β (Figura 2.2 c)). Este parâmetro fornece ainda bastante informação acerca do processo de falha. Uma função de risco crescente ($\beta > 1$), por exemplo, pode crescer a uma taxa decrescente (sendo a função de risco côncava), crescer a uma taxa constante (sendo a função de risco linear), ou crescer a uma taxa crescente (sendo a função de risco convexa), consoante o valor assumido de β (Figura 2.2 c)). Funções de risco crescentes a uma taxa crescente refletem um fenómeno de intenso desgaste. Por exemplo, pela Figura 2.2 c), para $\beta=4$ a função de risco é convexa, para $\beta=1.5$ é côncava e para $\beta=2$ é linear.

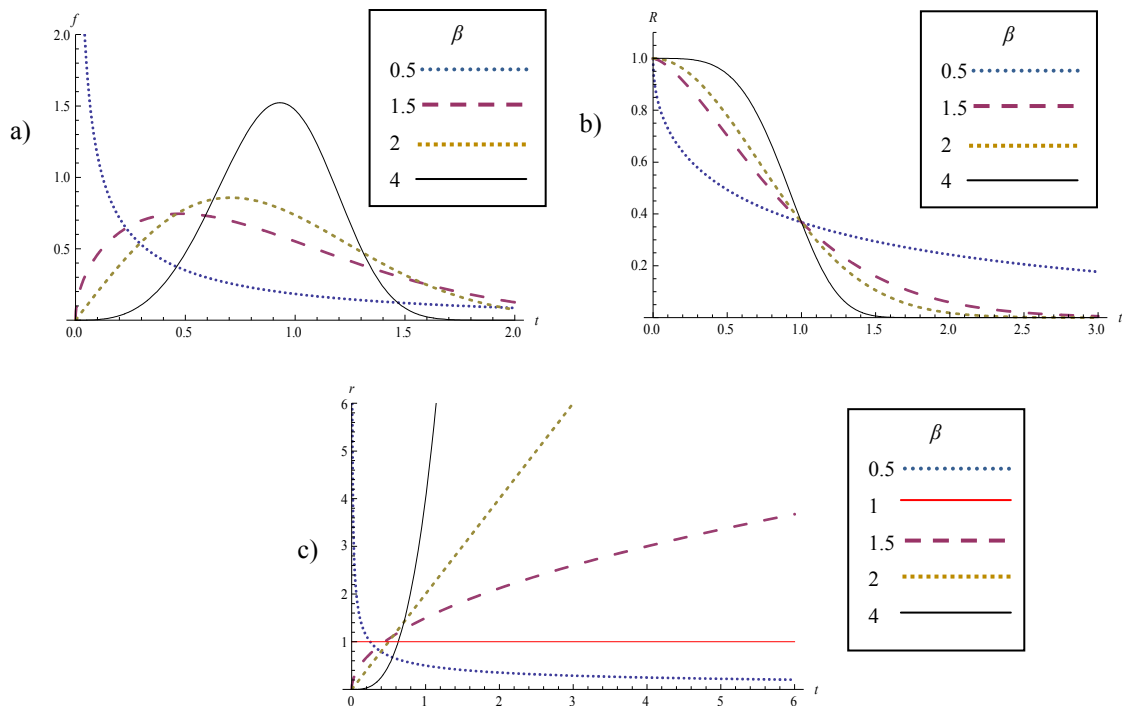


Figura 2.2 Efeito do parâmetro de forma na distribuição de Weibull: a) na função densidade de probabilidade; b) na função fiabilidade; c) na função de risco

O parâmetro θ é um parâmetro de escala que influencia a média e a dispersão da distribuição. O efeito de θ na dispersão da função densidade de probabilidade é ilustrado na Figura 2.3 a) para diferentes valores. Verifica-se também, pela Figura 2.3 b), que quanto maior for o valor de θ num determinado instante, maior é o valor da fiabilidade até esse mesmo instante. A inclinação da função de risco diminui quando θ aumenta

(Figura 2.3 c)). Além disso, verifica-se também que, para $\beta=2$, a função de risco é linear.

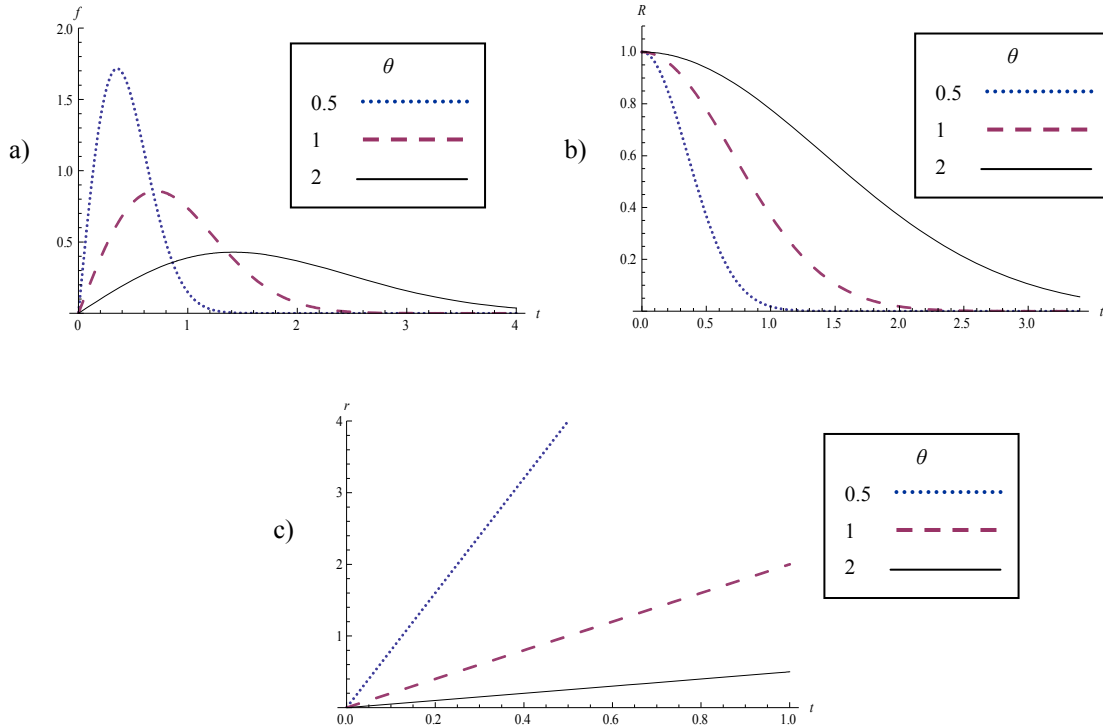


Figura 2.3 Efeito do parâmetro de escala da distribuição de Weibull: a) na função densidade de probabilidade; b) na função fiabilidade; c) na função de risco

Pela variedade de formas e propriedades que são possíveis obter através da distribuição de Weibull, e respetiva flexibilidade na representação de variadas situações reais, esta distribuição tem sido extensivamente usada na modelação de processos de falha.

2.8 Manutibilidade e disponibilidade

A maioria dos sistemas de engenharia é suscetível de manutenção, ou seja, são reparáveis em situação de falha. A facilidade, ou não, com que são realizadas as ações de reparação e manutenção determina a *manutibilidade* do sistema.

De acordo com a norma NP EN 13306, a *manutibilidade* é “a aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos”.

Locks (1995) define a manutibilidade, $M(t)$, como a probabilidade de uma reparação estar completa, no máximo, até ao instante t . Esta definição é complementar à definição de fiabilidade, $R(t)$, que é a probabilidade de o sistema funcionar adequadamente para além do instante t . Dada a semelhança de $M(t)$ e $R(t)$, uma vez que ambas estão relacionadas com a ocorrência de falhas ao longo do tempo, a mesma família de técnicas pode ser utilizada na análise de ambas. A análise mais simples da manutibilidade pode ser realizada através de tempos de reparação exponenciais.

Tal como a manutibilidade e a fiabilidade, também a disponibilidade é uma probabilidade. De acordo com a norma NP EN 13306, a *disponibilidade* é “a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, num dado instante ou num dado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos”.

Esta norma assume, ainda, que “essa aptidão depende da combinação da fiabilidade, da manutibilidade e da adequabilidade da manutenção”, salientando, também, que “os recursos externos necessários, excetuando os da logística da manutenção, não afetam a disponibilidade do bem”.

O’Connor (1991) refere que a manutibilidade afeta diretamente a disponibilidade, pois o tempo despendido em reparações de falhas e/ou numa ação preventiva de manutenção retira, normalmente, o sistema de um estado de disponibilidade. Refere, também, que existe uma forte relação entre fiabilidade e manutibilidade, uma afetando a outra, e ambas afetando a disponibilidade e os custos. Num estado estacionário, e assumindo que as ações de manutenção ocorrem a uma taxa constante, a disponibilidade, A_a , vem:

$$A_a = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MPMT} \quad (2.20)$$

onde:

MTBF (mean time between failure): tempo médio entre falhas

MTTR (mean time to repair): tempo médio de reparação

MPMT (mean preventive maintenance time): tempo médio de manutenção preventiva

Ebeling (1997) e Locks (1995) referem que a disponibilidade, A_a , assim definida, é uma variável aleatória, denominada de *disponibilidade alcançada (observada ou atual)*. Os mesmos autores indicam, ainda, a existência de um outro tipo de disponibilidade, a *disponibilidade inerente*, A_{inh} , baseada apenas nas distribuições das falhas e dos tempos de reparação, dado por:

$$A_{inh} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.21)$$

2.9 Síntese

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais de fiabilidade. Enfatizam-se as principais funções utilizadas em estudos de fiabilidade, analisando de um modo particular as características dessas funções no caso da distribuição de Weibull. A versatilidade desta distribuição permite a sua utilização em diversas situações, motivo pelo qual é usada para modelação das falhas na aplicação desenvolvida no Capítulo 6.

Conceitos como “falhas reveladas e não reveladas” ou “modos de falha”, assim como o conhecimento de noções relacionadas com modelação de sistemas reparáveis são fundamentais para o entendimento das políticas e modelos de manutenção existentes na literatura (objecto do capítulo seguinte), mas também para a compreensão dos modelos propostos nos capítulos 4 e 5.

3 Políticas e Modelos de Manutenção

O Capítulo 3 faz uma sistematização das principais políticas e modelos de manutenção preventiva constantes na literatura.

Para o efeito, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica às políticas e modelos mais tratados nos últimos anos.

Para uma melhor compreensão das políticas de manutenção abordadas, é feito um estudo preliminar relacionado com a manutenção, que considera noções como *manutenção preventiva*, *manutenção imperfeita* e outros conceitos relacionados.

A política de manutenção preventiva periódica tem, neste trabalho, um particular interesse, já que, na essência, é a política adotada no Capítulo 4 da presente tese, na perspectiva da construção de um modelo que otimize os custos de manutenção.

3.1 Introdução

Determinar uma política de manutenção adequada é uma importante tarefa no planeamento da manutenção. Geralmente, as políticas de manutenção dividem-se em dois tipos: manutenção corretiva e manutenção preventiva. Em sistemas reparáveis, estes dois tipos de manutenção desempenham um papel fundamental no comportamento do sistema. Os seus efeitos em termos de fiabilidade, disponibilidade e custo operativo são bem conhecidos. Em muitas situações, por exemplo, é financeiramente mais vantajoso substituir, em instantes predeterminados, partes ou componentes que ainda não falharam, do que esperar por uma falha do sistema, que pode, no limite, desencadear consequências económicas desastrosas. De facto, o custo é sempre um fator importante no planeamento da manutenção preventiva, uma vez que a fiabilidade e o risco são, muitas vezes, expressos em termos de custo. Nesse sentido, o tipo e o nível de manutenção que são usados na prática dependem do tipo de aplicações, dos custos do sistema, mas também dos requisitos de fiabilidade e segurança (Pham e Wang, 1996).

Nas últimas décadas, os problemas de manutenção e substituição de sistemas sujeitos a deterioração têm sido extensivamente estudados na literatura. Garg e Deshmukh (2006) apresentam uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos nos últimos anos. Muitos modelos de manutenção e substituição têm sido propostos, os quais podem ser incluídos em algumas categorias de políticas de manutenção existentes, tais como a política de substituição pela idade, a política de manutenção preventiva periódica, a política de manutenção condicionada, entre outras, cada uma das quais com diferentes características, vantagens e desvantagens. A maioria dos modelos existentes procura minimizar o custo total de manutenção. Existem outros, porém, que procuram minimizar o tempo de paragem do equipamento ou maximizar a disponibilidade, medida que acaba por se refletir também nos custos de operação.

Nakagawa (2002) considera que as políticas de manutenção denominam-se políticas de substituição quando os sistemas são não reparáveis, e são políticas de manutenção preventiva se os sistemas são reparáveis. Aqui, no entanto, não irá fazer-se esta distinção, encarando-se a substituição como um nível ou grau possível de manutenção, considerando-a, em particular, como uma ação de manutenção perfeita, a qual restitui o componente a uma condição de “tão bom como novo”.

Assim, no que respeita a políticas de substituição (ou ação perfeita de manutenção), Belzunce *et al.* (2006) referem que as mais vulgarmente usadas são a política de substituição pela idade e a política de substituição periódica (em bloco). Segundo os autores, esta última é mais simples de administrar, uma vez que não necessita recordar a idade dos componentes. Por outro lado, a substituição em bloco precisa de substituições mais frequentes e, conseqüentemente, o custo é maior. O mesmo estudo compara políticas de substituições planeadas com processos de renovação que incluem substituições não planeadas.

Gertsbakh (2000) e Kaio *et al.* (2002) apresentam extensões das políticas que consideram ser as duas principais famílias (clássicas) de políticas de manutenção preventiva: baseada na idade e periódica. Em particular, Kaio *et al.* (2002) estabelecem uma extensão da política de manutenção preventiva periódica, na qual o sistema é inspecionado em períodos de tempo previamente fixados, com o objetivo de descobrir falhas não reveladas no instante da sua ocorrência (normalmente, falhas não catastróficas), minimizando o custo esperado com as inspeções e com as falhas do sistema.

Wang (2002) faz um levantamento de políticas de manutenção que têm em conta a deterioração de sistemas, sumariando, classificando e comparando diferentes políticas de manutenção para sistemas constituídos por um só componente e para sistemas com dois ou mais componentes. O seu objetivo é o de classificar os modelos de manutenção de modo a que, na tomada de decisão, facilmente se identifique o modelo que melhor satisfaz os requisitos do problema. Wang e Pham (2006) fazem um estudo semelhante, incidindo particularmente na manutenção imperfeita.

Segundo Lopes (2007), de um modo geral, encontram-se na literatura vários modelos de manutenção preventiva que propõem diferentes políticas de substituição, entre as quais se destacam as que consideram:

- i) a substituição depois de decorrido um intervalo de tempo fixo de operação T ou no caso de ocorrência de falha;
- ii) a substituição em intervalos de tempo de operação constantes e independentes do número de falhas;

- iii) a substituição após um número preestabelecido de falhas;
- iv) derivações das políticas anteriores ou, ainda, as que consideram combinações das mesmas;
- v) a substituição baseada em limitações no custo de manutenção.

Muitas vezes, é difícil fazer uma atribuição clara dos modelos existentes a cada uma destas políticas. Contudo, tentar-se-á, a partir da Secção 3.4, apresentar alguns exemplos no que a políticas de manutenção preventiva diz respeito.

De seguida, apresentam-se algumas noções de manutenção, elementares para a compreensão de cada uma das políticas descritas posteriormente.

3.2 Tipos de manutenção

A manutenção pode ser organizada em duas categorias principais: a manutenção corretiva, CM (*corrective maintenance*), e a manutenção preventiva, PM (*preventive maintenance*).

De acordo com a norma NP EN 13306, a manutenção corretiva é a “manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida”.

O cariz reativo de uma ação de manutenção corretiva leva muitos autores (por exemplo, Wang e Pham, 2006) a denominarem-na de *reparação*.

A manutenção preventiva é definida, pela mesma norma, como a “manutenção efetuada a intervalos de tempo predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem”.

A manutenção preventiva incorpora, ainda, os seguintes subtipos: a *manutenção preventiva sistemática*, onde os trabalhos de manutenção são realizados em intervalos de tempo predeterminados; e a *manutenção preventiva condicionada*, onde os trabalhos de manutenção são levados a cabo apenas havendo indicações técnicas para a sua realização, nomeadamente através de um diagnóstico que indicie a aproximação de uma

avaria (análise de vibrações, por exemplo) ou uma avaliação mais imediatista do estado do equipamento (ruídos ou folgas visíveis, por exemplo).

Lin *et al.* (2001) dividem a manutenção preventiva sistemática em periódica e sequencial. As manutenções preventivas periódicas consistem em manutenções realizadas a intervalos constantes, sejam esses intervalos medidos em tempo de calendário, horas de funcionamento, quilómetros percorridos, unidades produzidas, etc. Um exemplo de manutenção preventiva periódica é a mudança de óleo e filtro de um automóvel a cada 10 mil km. Na manutenção preventiva sequencial, o componente é sujeito a manutenções numa sequência de intervalos que podem ter diferentes comprimentos. Este tipo de manutenção é mais adequado quando o componente requer uma manutenção mais frequente à medida que a sua idade aumenta.

A manutenção condicionada é uma manutenção em que a decisão de intervenção preventiva é tomada no momento em que há evidências de defeito iminente ou quando há aproximação de um nível de degradação predeterminado. A norma EN 13306 (2007) define a sua variante *manutenção preditiva* como a “manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem”. Normalmente, o termo “condicionada” utiliza-se mais para designar o processo de controlo da condição e o termo “preditiva” para designar as ações de manutenção decorrentes desse controlo.

A manutenção preventiva sistemática e a manutenção preventiva condicionada são ambas atividades planeadas. O sucesso da primeira depende do rigor com que é possível prever o período durante o qual o componente irá trabalhar sem falhar. O sucesso da segunda depende da eficácia dos recursos e da metodologia para vigiar o estado do equipamento. Muitas vezes, são levadas a cabo atividades sistemáticas (tais como medições, análises, etc.) que visam fornecer a informação necessária para a execução da manutenção preventiva condicionada.

Alguns autores, nomeadamente Cabral (2006), consideram um terceiro tipo de manutenção: a manutenção de melhoria, que inclui as modificações ou alterações destinadas a melhorar o desempenho do equipamento, ajustá-lo a novas condições de funcionamento, melhorar ou reabilitar as suas características funcionais. Trata-se de

uma área de esforço bem salientada pelas técnicas de TPM (*Total Productive Maintenance*), que se aprofundam na Secção 3.3.2.

O objetivo de uma política de manutenção é conseguir, agregando estes tipos de manutenção nas proporções ideais, um determinado padrão de desempenho a um custo mínimo. Este objetivo só pode ser atingido tendo em especial atenção uma manutenção planeada, aquela onde a gestão pode, efetivamente, intervir. Na manutenção não planeada, designadamente a manutenção corretiva, os acontecimentos são aleatórios e as suas consequências absolutamente imprevisíveis.

3.3 Manutenção preventiva

3.3.1 Introdução

Os primeiros estudos em modelos de manutenção preventiva assumem que: 1) as manutenções corretivas e preventivas são perfeitas ou mínimas; e 2) os tempos de manutenção são negligenciáveis. Estudos recentes (Badía *et al.*, 2002; Kallen e Noortwijk, 2006; Vaurio, 1999) continuam a assumir os estados AGAN (“as good as new”) ou ABAO (“as bad as old”) após as ações de manutenção. No entanto, essas considerações nem sempre se verificam na prática. A condição de um sistema complexo após uma ação de manutenção situa-se frequentemente entre a condição de “tão bom como novo” e a de “tão mau como imediatamente antes da ação de manutenção”, ou seja, a manutenção é *imperfeita*. Geralmente, a manutenção imperfeita é vista como qualquer ação de manutenção que torna o sistema “mais jovem” e, desse modo, melhora a condição operativa.

Após uma revisão, o motor de um carro, por exemplo, fica, normalmente, num estado intermédio algures entre AGAN e ABAO.

Assumir tempos de manutenção negligenciáveis também não é uma consideração realista. Em muitos sistemas, tais como aviões, centrais nucleares, explorações de petróleo, centrais químicas ou mesmo parques eólicos, as perdas de produtividade devido a tempos de indisponibilidade são muito elevadas. Por outro lado, nestas situações o tempo de paragem é, normalmente, fundamental, ou mesmo obrigatório,

para evitar falhas perigosas, cujas consequências podem ser catastróficas (Laggoune *et al.*, 2010).

Contudo, apesar de não realistas, considerar que uma manutenção é mínima ou perfeita e que a sua duração é negligenciável têm sido simplificações assumidas por diversos autores, na medida em que a formulação do problema de decisão sob tais considerações facilita em larga medida o manuseamento matemático das expressões e os respetivos métodos de solução.

3.3.2 Manutenção preventiva – abordagens recentes

Algumas abordagens recentes atuam, precisamente, nos domínios da manutenção planeada:

- A Manutenção Produtiva Total, TPM (*Total Productive Maintenance*), é um conceito moderno de manutenção introduzido no Japão nos inícios da década de 70, encontrando-se hoje perfeitamente implementada em vários países e com resultados notáveis. Na sua aplicação, o TPM cultiva ativamente a melhoria do estado dos equipamentos como resultado das manutenções, envolvendo os operadores das máquinas nas ações de reparação, explorando o facto de *o operador ser quem melhor conhece a máquina* e, portanto, quem pode tomar as medidas preventivas básicas necessárias ao seu bom funcionamento (Cabral, 2006). O TPM tem como objetivo principal a eliminação das falhas, defeitos e outras formas de perdas e desperdícios, visando a maximização global da eficiência das máquinas e dos equipamentos (normalmente abreviada por OEE – do inglês *Overall Equipment Efficiency*), com o envolvimento de todos, desde os operadores das máquinas ao pessoal da manutenção, até ao nível superior da gestão, passando pelos quadros intermédios. Algumas medidas preventivas são levadas a cabo pelos operadores (inspeções, lubrificações e limpezas) e outras são, na medida necessária, solicitadas ao pessoal da manutenção (especialistas), quando o seu âmbito exceder as capacidades técnicas dos operadores. As funções de manutenção dos operadores podem parecer, numa primeira análise, pouco importantes e ambiciosas. No entanto, a *inspeção* que o operador é capaz de fazer tem um enorme impacto na prevenção de avarias. Ao inspecionarem-se porcas e parafusos, por exemplo, é comum encontrar-se um número elevado de

componentes soltos, ou em falta, que conduzem a outras anomalias como desgastes, vibrações, fugas, etc..

- A manutenção centrada na fiabilidade, RCM (*Reliability Centered Maintenance*) foi inicialmente desenvolvida pela indústria aeronáutica americana na década de 60, mas a sua aplicação generalizou-se a partir dos anos 80. Esta abordagem visa essencialmente o reconhecimento do melhor balanceamento dos principais tipos e políticas de manutenção, em função do *grau de criticidade*³ (medida quantitativa do modo de falha que combina a probabilidade da ocorrência do modo de falha com o seu grau de severidade) de cada equipamento, de modo a atingir os objetivos técnico-económicos preestabelecidos. A metodologia de implementação é, normalmente, efetuada através da constituição de grupos de trabalho multidisciplinares e multifuncionais da produção e manutenção que, apoiados por especialistas, analisam os equipamentos. Pretende-se que esta análise conduza ao estabelecimento de programas de manutenção a aplicar, a procedimentos mais adequados na operação dos equipamentos e a alterações que devem ser realizadas no equipamento, de modo a que ele cumpra a sua função no respetivo contexto operacional.

3.3.3 Manutenção imperfeita

Como já foi referido anteriormente, as ações de manutenção podem, ainda, ser classificadas de acordo com a condição do equipamento após a ação de manutenção.

Wang e Pham (2006) apresentam cinco níveis ou graus possíveis de manutenção:

- Reparação ou manutenção perfeita: após a ação de manutenção, o sistema tem a mesma função de risco do que um sistema novo. Diz-se que estas ações restituem o sistema à condição AGAN. Geralmente, a substituição de um equipamento avariado por um novo é um exemplo deste nível de manutenção;
- Reparação ou manutenção mínima: após a ação de manutenção, o sistema tem a mesma função de risco que tinha imediatamente antes da falha. O estado

³ A criticidade indica a importância relativa do equipamento para o seu funcionamento e segurança no contexto operacional.

operativo do sistema após uma reparação mínima é, frequentemente, denominado por ABAO. A substituição de um pneu furado num carro é um exemplo deste nível de reparação, uma vez que a função de risco do carro permanece praticamente inalterada;

- Reparação ou manutenção imperfeita: após a ação de manutenção, o sistema assume uma condição intermédia entre AGAN e ABAO;
- “Worse repair or maintenance”: a ação de manutenção acaba por, não deliberadamente, aumentar a função de risco do sistema. O sistema assume, assim, uma condição “worse than old”;
- “Worst repair or maintenance”: a ação de manutenção conduz, de modo não deliberado, à falha do sistema.

De acordo com esta classificação, pode dizer-se que uma manutenção preventiva é perfeita (se deixa o sistema na condição AGAN), mínima (se deixa o sistema na condição ABAO) ou imperfeita (se deixa o sistema em qualquer um dos restantes três estados). Analogamente, uma manutenção corretiva pode também ser classificada como perfeita, mínima ou imperfeita. A Figura 3.1 ilustra a alteração da função de risco, consoante o grau da manutenção aplicada.

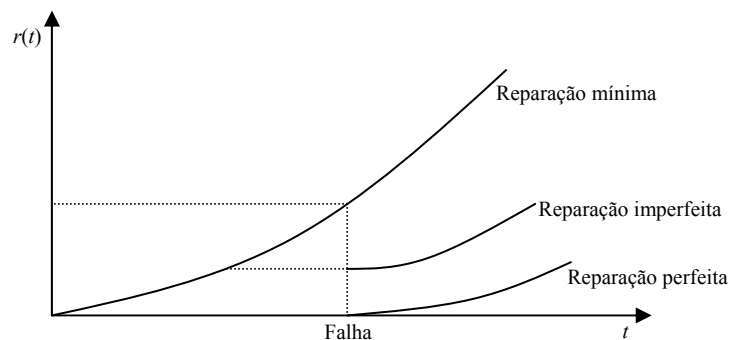


Figura 3.1 Função de risco para reparação mínima, perfeita e imperfeita

Na prática, o tipo e o nível da manutenção utilizada dependem do tipo de sistema e dos seus custos, assim como da segurança e fiabilidade pretendidas (Pham e Wang, 1996).

Centenas de modelos AGAN e ABAO foram criados e estes não traduzem fidedignamente a realidade (Wang e Pham, 2006).

Os modelos descritos na Secção 2.6 conduzem precisamente a estes dois primeiros níveis. Os três últimos níveis após a manutenção têm recebido menos atenção, pois envolvem muito maior complexidade nos modelos matemáticos utilizados.

Chiang e Yuan (2001) apresentam uma política de manutenção que permite determinar o tempo ótimo entre inspeções, de modo a minimizar o custo total médio por unidade de tempo. O modelo de deterioração é baseado num processo de Markov, em que cada componente assume um número finito de estados sequenciais. Assim, dependendo do estado do componente, procede-se alternativamente de uma das seguintes formas: (1) não é levada a cabo qualquer manutenção, permanecendo o componente no mesmo estado; (2) é realizada uma reparação (imperfeita), conduzindo o componente a um melhor estado do que o imediatamente antes da reparação; ou (3) é feita uma substituição do componente.

Segundo a norma NF X60-010 podem definir-se, também, cinco níveis de ações de manutenção (que, na realidade, podem ser medições, desmontagens, substituições, lubrificações, etc.), caracterizadas segundo o seu grau de complexidade técnica, qualificação dos executantes e meios envolvidos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Quadro resumo da classificação dos níveis de manutenção definidos pela norma NF X60-010

<i>Nível</i>	<i>Tipo de Intervenção</i>	<i>Técnico Requerido</i>
1	Regras simples previstas pelo fabricante por meio de órgãos acessíveis, sem qualquer desmontagem ou abertura do equipamento. Substituição simples de algum consumível como, por exemplo, um fusível.	Utilizador do equipamento. A efetuar no local com manual de operações e com recurso a materiais consumíveis.
2	Resolução da avaria por substituição de algum órgão ou componente previsto para o efeito ou operações simples de manutenção preventiva, por exemplo, lubrificação ou controlo de bom funcionamento do equipamento.	Técnico de qualificação média. A efetuar no local, com recurso ao manual de manutenção e segurança, ferramentas portáteis definidas no manual, materiais de uso corrente.
3	Diagnóstico, localização e reparação de avarias por substituição de componentes, reparações mecânicas simples e todas as operações correntes de manutenção preventiva como, por exemplo, regulações gerais e calibrações.	Técnico especializado. A efetuar em oficina local de apoio, com recurso ao manual de manutenção, ferramentas e aparelhagens definidas no manual, banco de ensaio, materiais de uso corrente e peças de reserva.
4	Trabalhos importantes de manutenção preventiva e corretiva com a exceção de renovações e reconstruções. Inclui-se aqui a calibração dos instrumentos de medida.	Equipas com enquadramento técnico especializado. A efetuar em oficina especializada ou no próprio local com deslocação de meios adequados. Normalmente, inclui a consulta de documentação especializada.
5	Renovação, reconstrução ou reparações gerais a executar em oficina ou confiadas a empresa exterior que poderá ser o fabricante e/ou o fornecedor do equipamento.	Equipa com enquadramento técnico altamente especializado. A executar em oficina externa e/ou do fabricante, utilizando meios muito semelhantes aos necessários para a fabricação.

3.3.4 Modelação de manutenções imperfeitas

Em muitas aplicações práticas reais, as ações de manutenção podem não conduzir os sistemas aos estados AGAN ou ABAO, definidos na secção anterior. Grande parte das ações de manutenção a sistemas complexos, tais como aviões, equipamentos médicos ou reatores nucleares, por exemplo, podem deixar os equipamentos numa situação intermédia, algures entre AGAN e ABAO. Diz-se, então, que a ação de manutenção é imperfeita.

Esta secção dará especial ênfase ao modelo fator de melhoria/ajustamento, já que é este o modelo adotado na modelação desenvolvida no Capítulo 4.

Outros métodos para modelar manutenções imperfeitas podem ser encontrados em Pham e Wang (1996) e Wang e Pham (2006).

3.3.4.1 Modelo (p, q)

Nakagawa (1979) modela a manutenção imperfeita do seguinte modo: após a ação de manutenção, o componente retorna à condição AGAN (manutenção preventiva perfeita) com probabilidade p e à condição ABAO (manutenção preventiva mínima) com probabilidade $q=1-p$. Se porventura $p=1$, a manutenção preventiva é perfeita e se $p=0$, a manutenção preventiva é mínima. Neste sentido, as manutenções preventivas perfeita e mínima são casos particulares da manutenção imperfeita.

3.3.4.2 Modelo $(p(t), q(t))$

Block *et al.* (1985) estendem o conceito do modelo (p, q) à idade t do componente no momento da falha. Assim, quando um componente falha, é levada a cabo uma reparação. Esta reparação é perfeita com probabilidade $p(t)$ e é mínima com probabilidade $q(t)=1-p(t)$, em que t representa o tempo decorrido desde a última reparação perfeita ao componente.

3.3.4.3 Modelo de idade virtual

Kijima *et al.* (1988) desenvolvem uma reparação imperfeita modelada pelo conceito de idade virtual (A_n). Este valor representa uma idade calculada de um componente imediatamente depois da n -ésima reparação ocorrer e é determinado por:

$$A_n = A_{n-1} + qx_n = qS_n.$$

O somatório

$$S_n = \sum_{i=1}^n x_i$$

é chamado “idade real” do componente (com $S_0=0$ e sendo x_i o tempo até à i -ésima falha) e q é o parâmetro de eficiência da reparação (ou rejuvenescimento).

De notar que se $q=0$ a reparação é perfeita e se $q=1$ a reparação é mínima. Desenvolvimentos recentes deste modelo podem ser vistos em Kijima (2002).

Kahle (2007) assume que a intensidade das falhas segue um processo de idade virtual, na sua forma geral proposta por Kijima e, nesse sentido, também considera um modelo de reparação imperfeito.

3.3.4.4 Modelo fator de melhoria/ajustamento

Malik (1979) propôs o conceito de *fator de melhoria/ajustamento* para a modelação de problemas de manutenção planeada. A sua motivação prende-se com o facto de o autor assumir que as ações de manutenção reduzem a função de risco do componente, sem que, por isso, retorne à condição de novo. Deste modo, as ações de manutenção preventiva conduzem o componente a uma condição entre AGAN e ABAO.

Assim, como alternativa ao que até aqui foi apresentado, o efeito da ação de manutenção pode ser modelado usando a idade efetiva do sistema ou a função de risco. Nesta perspetiva, considerando t_i ($i \geq 1$) o instante de tempo no qual é levada a cabo a i -ésima manutenção preventiva e assumindo $t_0=0$ o instante em que o componente é colocado em funcionamento, Lin *et al.* (2001) descrevem estes dois modelos de manutenção preventiva do seguinte modo:

- a) **Modelo de manutenção preventiva para a função de risco:** a função de risco após a i -ésima manutenção preventiva torna-se $h_i(x)=a_i h_{i-1}(x)$ para $x \in]t_i, t_{i+1}[$, quando era $h_{i-1}(x)$ para $x \in]t_{i-1}, t_i[$, onde $a_i > 1$ é um *fator de ajustamento* para a função de risco devido à i -ésima manutenção preventiva. Este modelo pressupõe ainda que, no instante em que o componente é colocado em funcionamento, a sua função de risco é zero ($h_0(0)=0$) e que cada manutenção preventiva levada a cabo posteriormente reconduz a zero o valor da função de risco, isto é, $h_i(t_i)=0$;
- b) **Modelo de manutenção preventiva para redução da idade:** a idade efetiva do equipamento após a i -ésima manutenção preventiva reduz-se para $b_i E_i$ se a idade efetiva do equipamento era E_i imediatamente antes da ação de manutenção, onde $b_i < 1$ é o *fator de melhoria* na idade efetiva do equipamento devido à i -ésima manutenção preventiva. Se se usar $h_0(x)$, com $x \in]0, t_1[$, para representar a função de risco antes da primeira manutenção preventiva, então $h_1(x)=h_0(b_1 t_1+x)$, para $x \in]t_1, t_2[$, representa a função de risco do componente no intervalo de tempo

$]t_1, t_2[$. A função de risco vem, então, em função da idade efetiva do componente e cada manutenção preventiva reduz essa idade efetiva até determinado ponto.

Nakagawa (1988) desenvolveu os dois modelos de manutenção preventiva para redução da idade e função de risco numa política de manutenção preventiva sequencial (Secção 3.6).

Lin *et al.* (2001) utilizaram um modelo híbrido de manutenção preventiva, no qual a função de risco após a primeira manutenção preventiva pode ser escrita como:

$$h(t_1+x) = a_1 h(b_1 t_1 + x), \quad \text{para } x > 0.$$

No mesmo trabalho, na modelação das atividades de manutenção preventiva, os autores introduzem o conceito de duas categorias de modos de falha: modo de falha *maintainable* e modo de falha *non-maintainable*, modo de falha tipo I e modo de falha tipo II, respetivamente, de acordo com a notação introduzida na Secção 2.4.2. A manutenção é considerada imperfeita, na medida em que permite a redução da função de risco do modo de falha tipo I, mas não pode alterar a função de risco do modo de falha tipo II. Por exemplo, manutenções preventivas a um equipamento podem incluir lubrificações, limpezas, substituições parciais do equipamento, etc., mas tais manutenções apenas podem reduzir a função de risco de modos de falha relacionados com estas funcionalidades. A eliminação de modos de falha inerentes à conceção do equipamento só pode ser conseguida levando a cabo uma substituição total. Numa abordagem mais realista, Castro (2008) e Zequeira e Berenguer (2006) consideram que os dois modos de falha são dependentes, diferenciando-se, contudo, no modelo de dependência. Em Zequeira e Berenguer (2006), essa dependência é expressa em termos de função de risco, no sentido em que a taxa de falha do modo de falha tipo I depende da função de risco do modo de falha tipo II. Para Castro (2008), essa dependência pode também ser considerada em termos de função de risco, uma vez que se assume que a função de risco do modo de falha tipo I depende do número de ocorrências de falha do modo de falha tipo II desde a instalação do sistema, utilizando para o efeito um fator de ajustamento.

Como já foi referido antes, os dois modos de falha descritos acima serão analisados com mais detalhe no Capítulo 4.

Cheng e Chen (2003) e Moghaddam e Usher (2010) modelam as atividades de manutenção preventiva, na perspectiva da redução da idade do equipamento.

Pascual e Ortega (2006) defendem que uma limitação do modelo proposto por Kijima (1989) prende-se com o facto de a taxa de falhas de referência não ser alterada. De forma a negociar o melhor contrato de garantia para um determinado equipamento, Pascual e Ortega (2006) propõem um modelo para a determinação do intervalo entre manutenções periódicas que minimiza os custos globais de manutenção. Sob esta perspectiva, são considerados três tipos de ações de manutenção: i) a substituição, que naturalmente deixa o bem num estado AGAN; ii) a reparação mínima, após a qual o bem retorna à condição de ABAO; e, por último, iii) o caso geral, uma ação de manutenção imperfeita, que situa o bem entre estes dois estados limite. Para modelar esta manutenção imperfeita, consideram $\lambda_k(t)$ a função de risco após a k -ésima manutenção preventiva, expressando-a da seguinte forma:

$$\lambda_k(t) = p\lambda_{k-1}(t - T_S) + (1-p)\lambda_{k-1}(t) \quad (k = 1, 2, \dots, n-1),$$

onde T_S é o intervalo de tempo entre manutenções periódicas e $p \in [0, 1]$ é o fator de melhoria. De notar que, se $p=0$, $\lambda_k(t) = \lambda_{k-1}(t)$, isto é, está a ser considerada uma manutenção mínima. Se $p=1$, $\lambda_k(t) = \lambda_{k-1}(t - T_S)$, ou seja, a manutenção é perfeita. Uma modelação semelhante da manutenção preventiva imperfeita já tinha sido apresentada por Zhang e Jardine (1998).

3.3.5 Medidas de desempenho

Nas últimas décadas tem-se assistido a uma substituição progressiva da mão de obra por investimentos em sistemas tecnológicos flexíveis, dotados de uma forte componente de automação, à globalização da produção e dos mercados e à implementação de novas técnicas de operação e manutenção mais adaptadas às diferentes realidades do mercado. Destas alterações surgiram, inevitavelmente, novas e incontornáveis medidas de avaliação da competitividade das empresas. Atualmente, espera-se que a disponibilidade dos sistemas e a fiabilidade e segurança de equipamentos, produtos e processos, garantam uma elevada produtividade e qualidade dos bens e serviços. É, então, necessária a criação de instrumentos que permitam avaliar em que medida os objetivos estrategicamente fixados estão, ou não, a ser cumpridos. Neste sentido, as medidas de

desempenho, quando criteriosamente selecionadas de acordo com o objetivo a avaliar, podem ser um recurso indispensável aos gestores para obtenção de informação acerca do efetivo desempenho dos equipamentos, para divulgação de progressos, para aumento de motivação e comunicação e para diagnóstico de problemas. Porém, muitas vezes, o valor de uma medida de desempenho, em si, não tem um significado absoluto importante, pelo que, frequentemente, é usada para comparar o desempenho de diferentes organizações, empresas, departamentos, serviços, equipas e indivíduos.

Tais medidas de desempenho podem ser classificadas de diferentes modos, conforme a perspetiva, nomeadamente em: medidas financeiras e não financeiras, medidas de resultados, medidas internas e medidas externas (Nunes, 2005). Uma outra classificação, apresentada por Kaplan e Norton (1996), prende-se, ainda, com o âmbito das medidas e podem agrupar-se em:

- Medidas de diagnóstico – usadas para monitorar e controlar as operações do dia a dia;
- Medidas estratégicas – selecionadas para informar os acionistas dos objetivos estratégicos da empresa ou organização e dos progressos que são feitos para os atingir.

Campbell (1995) classifica as medidas de desempenho da manutenção em três categorias distintas:

- Medidas de desempenho do equipamento: disponibilidade, fiabilidade, OEE (*Overall Equipment Effectiveness*);
- Medidas de desempenho relacionadas com os custos: custos de mão de obra, custos de materiais;
- Medidas de desempenho do processo: relação entre o trabalho planeado e não planeado, em conformidade com o que foi previamente programado.

Na otimização da manutenção, a finalidade é, geralmente, a maximização dos lucros ou a minimização dos custos. No entanto, em muitos casos que têm este mesmo objetivo, nomeadamente entidades prestadoras de serviços públicos (transportes, redes elétricas,

telecomunicações), a falta de disponibilidade conduz, inevitavelmente, ao desprestígio e até à ruína. Para um grande conjunto de situações reais, a disponibilidade (fração de tempo em que o sistema está disponível para utilização) é uma medida de desempenho apropriada e, por isso, tem sido considerada por muitos autores no desenvolvimento de modelos de manutenção (p.e., Badía *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2006; e Sheu *et al.*, 2006).

3.3.6 Custos de manutenção

Empresas sensíveis à importância da manutenção encaram-na, não como um custo, mas como um investimento, do qual, obviamente, se espera extrair lucro, quer direta, quer indiretamente.

Os custos de manutenção são frequentemente divididos em duas grandes categorias: os custos de manutenção que advêm de uma manutenção preventiva e os custos de manutenção determinados pela ocorrência de falhas.

Os custos de manutenção resultantes de uma manutenção preventiva constituem a parte mais simples de determinar e decompõem-se, normalmente, em:

- Custo de mão de obra: salários e encargos sociais com o pessoal diretamente produtivo;
- Custo de materiais: produtos consumidos, ferramentas de fácil desgaste e peças substituídas;
- Custo de serviços: custo dos serviços aplicados por terceiros (inclui subcontratação).

Os custos de manutenção determinados pela ocorrência de falhas são mais difíceis de determinar. Contudo, quando criteriosamente calculadas, as perdas de produção devidas a paragens da máquina por avaria ou diminuição de rendimento são tão reais como os salários dos operários ou os gastos com energia eléctrica.

De seguida, apresentam-se alguns exemplos de custos de manutenção que podem decorrer de uma avaria:

- Custos resultantes da perda de produtividade: custo de mão de obra desocupada em caso de paragem e, posteriormente, custos adicionais com mão de obra para assegurar o cumprimento dos objetivos de produção, custos de equipamentos adquiridos para garantir o fluxo de produção previsto, lucros perdidos, ou mesmo penalidades, em consequência de incumprimento de compromissos de fornecimento;
- Custos de defeitos de fabrico: custo das matérias-primas em curso no momento da falha e custo de produtos eliminados, substituídos ou reparados, por apresentarem defeitos de fabrico consequentes de um funcionamento inadequado da máquina, originado pela iminência da falha;
- Custo da perda de imagem comercial: se as paragens de produção forem frequentes e, como consequência, a qualidade dos produtos for degradada, a imagem da empresa no mercado é, naturalmente, afetada. De todos os custos decorrentes de falhas, este é, sem dúvida, o mais difícil de quantificar. Contudo, é muito importante que sobre ele se reflitam e se façam estimativas, uma vez que a imagem assume, nos dias que correm, importância primordial como fator de competitividade das empresas.

A estes custos de manutenção acrescem, ainda, custos não diretamente imputáveis a objetos individualizados: *custos gerais* (custos administrativos, custos de posse de materiais, etc.) e *custos de estrutura* (custos imputáveis aos encargos com chefias e setores não produtivos). Os custos não diretamente imputáveis à manutenção não são tidos em conta no presente trabalho.

Fixada uma orientação estratégica e definidos os objetivos para a manutenção, torna-se necessário estabelecer uma política de manutenção que os concretize. A política de manutenção adotada vai implicar a tomada de decisão em vários domínios. Este tema é abordado nas secções seguintes.

3.4 Manutenção preventiva baseada na idade

A manutenção preventiva dependente da idade talvez seja a mais comum e conhecida política de manutenção. Sob esta política, um componente é substituído quando atinge a

idade T (constante) ou na falha, caso se verifique primeiro (Barlow e Hunter, 1960). Gertsbakh (2000) acrescenta que cada substituição renova completamente o componente e que o seu tempo de execução é negligenciável. Atendendo a estas características básicas, esta política aplica-se essencialmente a componentes que não afetem a segurança e fiabilidade do sistema e quando a indisponibilidade e os custos resultantes da ação de substituição são da mesma ordem de grandeza de uma ação de manutenção imperfeita. Entende-se que os componentes a serem sujeitos a tal política deverão ser componentes pouco dispendiosos, de fácil substituição ou que não haja possibilidade de reparação (como por exemplo, a substituição de um fusível), ficando muitas vezes a cargo do operador da máquina a operação. No entanto, à medida que os conceitos de reparação mínima e, em geral, de manutenção imperfeita se tornaram mais vulgarizados, muitas extensões da política de manutenção baseada na idade foram propostas (p.e., Pham e Wang, 1996). De notar que a manutenção preventiva no instante T ou a manutenção corretiva na falha podem ser mínimas, imperfeitas ou perfeitas. De acordo com os diferentes tipos de manutenção, preventiva e corretiva, muitos modelos foram propostos.

Considerando uma política de substituição pela idade, Vaurio (1999) desenvolveu um modelo de indisponibilidade e custos para componentes sujeitos a inspeções periódicas. O autor refere que, sob determinadas condições, os resultados obtidos são aproximadamente os mesmos se for utilizada a manutenção preventiva periódica (Secção 3.5). Zequeira e Bérenguer (2005) estendem o trabalho de Vaurio (1999) ao caso em que algumas das inspeções são acompanhadas de testes preditivos, os quais podem detetar a iminência de falha futura.

Chien (2008) apresenta um modelo geral de manutenção preventiva baseado na idade, onde, perante a falha, é levada a cabo uma substituição (com probabilidade p) ou uma reparação mínima (com probabilidade $1-p$), utilizando, assim, o modelo (p,q) , apresentado na Secção 3.3.4.1, para a modelação das ações de manutenção imperfeita. Nosoohi e Hejazi (2011) consideram que o componente é sempre substituído por um novo ($p=1$), assumindo diferentes custos associados, tais como custos de indisponibilidade, custos de aquisição de material, custos relativos aos recursos humanos, bem como outros custos indiretos.

Castro *et al.* (2010) propõem e comparam duas políticas de manutenção: uma política de manutenção baseada na idade com reparações mínimas e uma política de manutenção baseada na idade com reparações perfeitas, a qual os autores denominam “política *pura* de manutenção baseada na idade”.

Wang e Pham (1999) fazem outra extensão desta política, denominando-a como “política mista de manutenção preventiva baseada na idade”. Nesta política, após a n -ésima reparação imperfeita são assumidas dois tipos de falha: a falha tipo I, que representa uma falha grave no sistema; e a falha tipo II, representando uma falha ligeira que pode facilmente ser removida. Assim, quando existe uma falha no componente, ela é de tipo I com probabilidade $p(t)$ e de tipo II com probabilidade $q(t)=1-p(t)$. As falhas tipo I são sujeitas a reparações perfeitas e as falhas tipo II a reparações mínimas. Consequentemente, cada reparação é perfeita com probabilidade $p(t)$ e mínima com probabilidade $q(t)=1-p(t)$, conforme o modelo apresentado na Secção 3.3.4.2, para modelação de manutenções preventivas imperfeitas. Após as primeiras n reparações imperfeitas, o componente é sujeito a uma ação de manutenção perfeita na idade T ou na primeira falha tipo I, se ocorrer antes de T . As variáveis de decisão desta política são T e n . No entanto, se $p(t) \cong 0$ e $n \cong 0$, a política torna-se uma “substituição periódica com reparações mínimas nas falhas” (Secção 3.5). No caso de $p(t) \cong 1$ e $n \cong 0$, tem-se uma política de substituição baseada na idade. Um estudo semelhante é realizado por Badía e Berrade (2009a).

3.5 Manutenção preventiva periódica

Numa política de manutenção preventiva periódica, uma manutenção preventiva é levada a cabo a cada intervalo de tempo constante, previamente fixado, kT ($k=1, 2, \dots$), independente do histórico de falha do componente. Em muitos estudos, o componente é substituído não apenas em instantes predeterminados kT ($k=1, 2, \dots$), mas também quando ocorre falha, denominando-se a política, nestes casos, por *política de substituição em bloco*. Este nome deriva da prática da substituição em bloco de vários componentes constituintes de um sistema. Uma vertente básica desta política é a *política de substituição periódica com reparação mínima nas falhas*, onde um componente é substituído a cada instante kT ($k=1, 2, \dots$), predeterminado, e na qual as falhas entre manutenções preventivas são removidas através de reparações mínimas

(Barlow e Hunter, 1960). Castro (2008) desenvolve um modelo de manutenção preventiva (imperfeita) periódica com reparações mínimas na ocorrência de falhas para um sistema sujeito a dois modos de falha: *maintainable* e *non-maintainable* (já discutidas na Secção 2.4.2 e denominadas por modo de falha tipo I e tipo II, respetivamente). Sheu *et al.* (2006), no entanto, consideram uma política de manutenção preventiva periódica que maximiza a disponibilidade de um sistema reparável. Estes autores assumem que, na ocorrência de falhas, as reparações são perfeitas. As manutenções preventivas, por outro lado, podem assumir diferentes graus.

Wu *et al.* (2011) consideram também uma política de manutenção preventiva, assumindo o custo e o valor da manutenção para o comprador, na ótica dos contratos de garantia. Também Pascual e Ortega (2006) descrevem uma política de manutenção preventiva periódica, permitindo a negociação do comprador durante o período de garantia.

Kaio *et al.* (2002) referem a facilidade da administração da política de substituição em bloco e identificam três variações possíveis, no caso de ocorrência de falha entre manutenções preventivas, para os modelos dela derivados:

- i) O componente que falhou é perfeitamente reparado logo após a ocorrência da falha;
- ii) O componente permanece em falha até ao instante da próxima manutenção preventiva, previamente planeada;
- iii) O componente que falhou é reparado através de uma reparação mínima.

Wang e Pham (1999) estendem a política de substituição em bloco a um caso geral. Nesse trabalho, é aplicada uma reparação mínima ao componente, em caso de falha, se o número de reparações levadas a cabo é menor do que um inteiro positivo N . Após a N -ésima reparação imperfeita, o componente é sujeito a manutenções preventivas nos instantes constantes kT ($k=1, 2, \dots$). A manutenção preventiva levada a cabo também é considerada imperfeita, no sentido em que, após a ação, o componente está “as good as new” com probabilidade p e “as bad as old” com probabilidade $1-p$ (conforme modelação apresentada na Secção 3.3.4.1). Depois de uma ação de manutenção

preventiva perfeita, o processo de manutenção é repetido. Assim, se as reparações, mediante ocorrência de falhas, e as manutenções preventivas são perfeitas e $N \cong \infty$, o modelo reduz-se a uma política de substituição em bloco. No caso de a reparação na falha ser mínima, de a manutenção preventiva ser perfeita e de $N \cong \infty$, este modelo assemelha-se a uma política de substituição periódica com reparação mínima nas falhas.

A adoção desta política faz especialmente sentido se uma falha no componente afetar claramente a segurança e a fiabilidade e se o tempo e custos de indisponibilidade e os custos de uma manutenção corretiva forem muito elevados. A sua aplicação tem como base a análise do histórico de avarias e as informações dadas por especialistas e pelo fabricante. Os resultados obtidos em aplicações simples são eficazes, muito embora em equipamentos complexos os modelos matemáticos se compliquem consideravelmente. Além disso, os modelos de fiabilidade não traduzem fidedignamente fatores como erros de conduta no manuseamento do equipamento e algumas relações de dependência existentes.

3.6 Manutenção preventiva sequencial

Numa política de manutenção preventiva sequencial, ao contrário de políticas de manutenção preventiva periódica, as ações de manutenções são levadas a cabo em intervalos de tempo com comprimentos desiguais. Considera-se a necessidade de manutenção mais frequente à medida que a idade do componente avança, assumindo, portanto, intervalos entre manutenções cada vez mais curtos ao longo do tempo. Contudo, políticas de manutenção preventiva periódica são mais fáceis de implementar, pois as ações acontecem em intervalos de tempo fixos, ainda que provavelmente apresentem custos superiores. Parece, portanto, razoável, dizer-se que uma política de manutenção preventiva sequencial é preferível para componentes dispendiosos, para os quais o esforço de cálculo adicional é justificado com os benefícios relativos aos custos. Para outro tipo de componentes, uma política de manutenção preventiva periódica deverá ser uma melhor escolha (Lugtigheid *et al.*, 2007).

Lin *et al.* (2001) referem que as políticas de manutenção preventiva podem ser divididas em duas categorias principais: periódica e sequencial. Nesse mesmo trabalho, e para a modelação das atividades de manutenção preventiva, os autores introduzem o conceito

de duas categorias de modos de falha (*maintainable* e *non-maintainable*, ou seja, tipo II e tipo I, respectivamente) e as manutenções preventivas (imperfeitas) são aplicadas em intervalos de tempo sequenciais e não periódicos, tendo como objetivo a determinação dos instantes ótimos de manutenção que minimizam o custo médio por unidade de tempo. Nakagawa (1988) discute uma política de manutenção preventiva (imperfeita) sequencial e, sob esta política, analisa dois modelos distintos, que incluem fatores de melhoria/ajustamento: 1) as manutenções preventivas reduzem a função de risco e 2) as manutenções preventivas reduzem a idade do componente. O objetivo é, uma vez mais, a determinação dos instantes ótimos de manutenção x_k ($k = 1, 2, \dots, N$), que minimizam o custo médio por unidade de tempo. O componente é substituído na N -ésima manutenção preventiva. Mais recentemente, Nakagawa (2002) faz uma análise mais aprofundada deste trabalho.

3.7 Manutenção preventiva condicionada

Sob uma política de manutenção preventiva condicionada, uma ação manutenção preventiva é levada a cabo apenas quando a função de risco do componente, ou qualquer outro índice de fiabilidade, atinge um determinado nível. Assim, são utilizadas técnicas específicas para a medição contínua ou periódica de parâmetros de fiabilidade do equipamento, que dão indicações acerca do seu estado ou condição, sendo que as ações de manutenção são decididas em função do seu estado. Neste contexto, as falhas iminentes são corrigidas através de reparações. Considerando um sistema sujeito a deterioração aleatória e discretamente monitorizado por inspeções perfeitas não periódicas, Grall *et al.* (2002) desenvolveram um modelo analítico que minimiza os custos totais de manutenção baseado numa política de manutenção preventiva baseada na condição do sistema. Neste trabalho, as falhas são detetadas no instante da sua ocorrência e, quando o são, o sistema é substituído no momento da inspeção seguinte. Em cada instante de inspeção, e de acordo com a avaliação efetuada, é decidido: i) se o sistema é substituído ou ii) o instante da próxima inspeção do sistema. Dieulle *et al.* (2003) fazem um estudo muito semelhante ao anterior, assumindo, no entanto, que as falhas são apenas detetadas através da inspeção.

Também com o objetivo de prevenir a ocorrência de falhas minimizando os custos de manutenção, Zequeira e Bérenguer (2005) propõem um modelo que visa a aplicação

periódica de testes ou inspeções para a detecção de uma falha no sistema ou de testes preditivos para a determinação do tempo até à próxima falha do sistema, sendo que as ações de manutenção são aplicadas de acordo com esses resultados. Ainda com o mesmo objetivo económico, Chiang e Yuan (2001) baseiam-se numa política de manutenção dependente do estado, considerando um sistema cuja deterioração se caracteriza por um processo de Markov. Para analisar o estado do sistema são realizadas inspeções periódicas.

Esta política permite que o sistema trabalhe acima de um nível de fiabilidade considerado aceitável. Aplicações desta política podem ser encontradas em Pham e Wang (1996). Saliente-se que apesar de ser considerada como a política mais vantajosa, a sua implementação exclusiva não é possível, sendo aplicada frequentemente em sobreposição da manutenção preventiva sistemática (periódica ou sequencial), como são exemplos os casos enunciados acima. De um modo geral, a concretização de modelos de manutenção condicionada requer muito esforço computacional (Wang, 2002).

3.8 Manutenção preventiva baseada nos custos de manutenção ou no tempo de reparação

Nesta abordagem, quando um componente falha é estimado o custo da sua reparação. A reparação só é levada a cabo se esse custo for inferior a um predeterminado valor limite. Caso contrário, o componente é substituído. Extensões desta política podem ser encontradas em Wang (2002), em Pham e Wang (1996) e Wang e Pham (2006). Neste último trabalho, é feita a distinção entre duas políticas: *política de custo limite de reparação* e *política de tempo limite de reparação*. A primeira assemelha-se ao que já foi descrito. A segunda diz respeito à existência de falha e consequente reparação. Se a reparação não está completa dentro de um tempo predeterminado T , então o componente é substituído por um novo. Caso contrário, o componente é reparado e colocado novamente em operação.

3.9 Manutenção para sistemas com mais do que um componente

As políticas de manutenção descritas nas secções anteriores são representativas de sistemas constituídos por apenas um componente. Quando os sistemas são constituídos por mais do que um componente, poder-se-á aplicar uma política de manutenção ótima

a cada componente separadamente, desde que não haja dependência entre eles. Wang e Pham (2006) consideram três tipos de dependência entre componentes de um sistema: a) dependência econômica; b) dependência de falha; e c) dependência estrutural (por exemplo, estrutura série).

Existindo, por exemplo, dependência econômica, a política de manutenção ótima não é aquela que considera cada componente separadamente e as decisões de manutenção não são independentes. Uma ação de manutenção ótima para um dado componente num determinado instante depende do estado dos restantes componentes do sistema, isto é, corrigir uma falha de um componente resulta numa oportunidade de realizar ações de manutenção nos outros componentes, resultando, assim, numa *política de manutenção de oportunidade*. Normalmente, os custos e/ou o tempo de implementação de ações de manutenção em todos os componentes é menor do que a implementação da manutenção separadamente.

A dependência de falha consiste numa dependência estocástica das distribuições de falha dos componentes. Sob uma política de manutenção periódica, e inspirados num problema real de manutenção de aparelhos médicos, Taghipour e Banjevic (2011) propõem um modelo que visa a determinação do intervalo de inspeção ótimo para um sistema constituído por múltiplos componentes cujas falhas podem ser não imediatamente reveladas.

Laggoune *et al.* (2010), baseados, também, numa política de manutenção preventiva periódica, apresentam um modelo de manutenção que tem como objetivo a coordenação da substituição de múltiplos componentes, estruturados em série, com dependência econômica.

3.10 Síntese

Neste capítulo é possível encontrar um conjunto de noções gerais sobre manutenção, acompanhadas de uma extensa pesquisa bibliográfica recente que se revela com particular interesse para este trabalho.

Foram distinguidas, pela sua essência, frequência e vantagens de utilização, diferentes políticas de manutenção, tendo sido realizado um esforço no sentido de agrupar os

modelos desenvolvidos recentemente pelas diferentes políticas estudadas. A tarefa de sistematização mostrou-se difícil, na medida em que os modelos de manutenção apresentados nos últimos anos acabam por desenvolver, na sua maioria, extensões das políticas abordadas.

A Tabela 3.2 faz um resumo das políticas mais abordadas na literatura, apresentando as suas características primárias e, também, as características dos sistemas aos quais as políticas melhor se adaptam.

Tabela 3.2 Síntese das principais políticas de manutenção

<i>Política de manutenção preventiva</i>	<i>Descrição e aplicabilidade</i>
Baseada na idade	Uma manutenção preventiva é realizada quando o sistema atinge uma determinada idade. Adequa-se a componentes que não afetem a segurança e a fiabilidade do sistema e cujo custo de indisponibilidade e de substituição seja reduzido.
Periódica	Uma manutenção preventiva é realizada a cada intervalo de tempo constante. De fácil implementação, adequa-se quando o sistema tem função de risco constante ou quando a falha de um componente afeta a segurança e a fiabilidade do sistema e os custos de indisponibilidade e de uma manutenção corretiva são muito elevados.
Sequencial	Uma manutenção preventiva é realizada em intervalos de tempo cada vez mais curtos ao longo do tempo. De maior dificuldade de implementação do que a política de manutenção periódica, adequa-se a componentes dispendiosos com função de risco crescente, para os quais o esforço de cálculo adicional dos períodos desiguais de manutenção é justificado com os benefícios relativos aos custos.
Condicionada	Uma manutenção preventiva é realizada quando a função de risco do sistema atinge um determinado nível. É vista como a política mais vantajosa, na medida em que permite que o sistema trabalhe acima de um nível de fiabilidade considerado aceitável. No entanto, a sua implementação exclusiva não é possível, sendo frequentemente aplicada em conjunto com uma política de manutenção periódica ou sequencial, no sentido de aferir a condição do sistema, sendo que as ações de manutenção a realizar são decididas em função dessa condição.

4 Modelo de Manutenção de um Sistema Tecnológico

Neste capítulo é proposto um novo modelo para os custos de manutenção de um sistema tecnológico. Os pressupostos do modelo não tentam a simplificação analítica e, por isso, o modelo assume um caráter realista e genérico.

Tendo como base os capítulos 2 e 3, caracteriza-se o sistema em estudo e descreve-se a política de manutenção a levar a cabo. As falhas são modeladas, sendo analisados a interação entre elas e os efeitos nas mesmas de uma política de manutenção preventiva periódica. De um modo exaustivo, analisam-se os custos da política de manutenção proposta.

O capítulo termina com uma breve aplicação numérica do modelo desenvolvido.

4.1 Introdução

Nos objetivos da tese consta o desenvolvimento de uma metodologia e de algoritmos que permitam, de forma sistemática e eficaz, a determinação de períodos de inspeção ótimos para sistemas complexos, descritos por processos estocásticos. Assim, este capítulo pretende desenvolver um modelo para uma política de manutenção preventiva imperfeita e periódica. Considera-se que as falhas do sistema podem ser agrupadas em duas categorias ou modos: modo de falha tipo I e modo de falha tipo II, respectivamente *maintainable* e *non-maintainable*, analogamente a Castro (2008), Lin *et al.* (2001) e Zequeira e Berenguer (2006). Em termos práticos, presume-se que o sistema tem determinadas funções, cuja degradação que conduz à indisponibilidade do sistema pode ser removida através de ações de manutenção preventiva (modo de falha tipo I). Por outro lado, remover a degradação proveniente de outras funções do sistema é, apenas, possível fazendo a substituição completa do sistema, que lhe restitui a condição AGAN. Normalmente, ações de manutenção preventiva tais como a limpeza, a lubrificação ou mesmo a substituição parcial do sistema podem restabelecer a condição “tão bom como novo” relativamente a alguns modos de falha (tipo I). A propensão de falha crescente de outros modos de falha (tipo II), devido ao desgaste, por exemplo, não é eliminada por ações de manutenção preventiva.

Como se poderá ver mais adiante, um modelo desta natureza pode ser aplicado a um sistema com vários componentes em série, no qual alguns dos componentes são substituídos frequentemente, enquanto outros são substituídos de forma menos frequente. Os modos de falha tipo I correspondem aos componentes substituídos frequentemente, enquanto os modos de falha tipo II correspondem aos componentes substituídos com menor frequência. No entanto, há que notar que a degradação dos componentes frequentemente substituídos pode depender do grau de degradação dos componentes que se substituem menos vezes, devido a, por exemplo, interações físicas, tais como a vibração ou altas temperaturas.

O modelo aqui desenvolvido estende o modelo desenvolvido por Castro (2008). Em ambos a degradação de um sistema e também a dependência entre modos de falha tipo I e modos de falha tipo II podem ser caracterizadas em termos de função de risco. Em particular, considera-se que a função de risco do modo de falhas tipo I depende do

número de falhas tipo II ocorridas no sistema até à inspeção anterior. Porém, enquanto Castro (2008) assume que a ocorrência de falhas é imediatamente revelada, o modelo proposto neste capítulo assume que a ocorrência destes dois modos de falha pode ser imediatamente detetada (com probabilidade p) ou apenas detetada na inspeção seguinte (com probabilidade $1-p$). Em Badía *et al.* (2002) este conceito também é usado, modelando inspeções imperfeitas e manutenções preventivas perfeitas. Em Kallen e Noortwijk (2006) são analisadas as funções custo nos dois cenários distintos: 1) as falhas são imediatamente detetadas na sua ocorrência, e 2) as falhas são apenas detetadas através de inspeções.

Salienta-se que, neste contexto, uma falha não tem que, necessariamente, conduzir à paragem e conseqüente indisponibilidade do sistema. O termo “falha” pode, apenas, refletir um funcionamento inadequado do sistema e, por isso, não ser imediatamente detetado (falhas não reveladas).

No caso em que as falhas são não reveladas, reconhecem-se custos associados ao tempo de não deteção da falha que, embora de difícil estimativa, podem incorporar uma redução da taxa de produção, ou até mesmo perdas ou não-conformidades, custos de retrabalho, custo adicionais de não cumprimento de prazos de entrega, perdas de materiais e matéria-prima, degradação da qualidade do serviço, etc..

Na maioria da literatura existente, incluindo Castro (2008), os tempos de manutenção são ignorados quando se pretende determinar uma política de manutenção ótima. Esta simplificação tem, claramente, vantagens na facilidade de manuseamento das expressões obtidas através dos modelos, mas só pode ser considerada realista em sistemas muito particulares. Na maior parte dos sistemas, porém, gerará resultados irrealistas. Alguns estudos, porém, têm vindo a assumir tempos de manutenção nos seus problemas de otimização, tais como (Vaurio, 1999; Jhang, 2005; Wang e Pham, 1999; Wu e Clements-Croome, 2005; Zaqueira e Bérenguer, 2004). Por este motivo, e pretendendo apresentar um modelo suficientemente genérico e abrangente para que possa ter aplicabilidade prática, no modelo proposto na Secção 4.2 as ações de manutenção preventiva levadas a cabo, bem como a substituição total do sistema não são instantâneas.

Pela facilidade de implementação prática, pressupõe-se que as inspeções e manutenções preventivas são realizadas em intervalos de tempo periódicos e que o sistema é totalmente substituído findo um determinado número de inspeções e manutenções preventivas. Sempre que uma falha seja detetada (quer de modo imediato, quer na inspeção seguinte), é levada a cabo uma reparação mínima, que recoloca o sistema em operação na condição ABAO. Assumem-se custos relativos a inspeções e manutenções preventivas, reparações mínimas, substituições, bem como custos associados a não deteções imediatas das falhas e a indisponibilidades do sistema.

Com a aplicação deste modelo pretende-se a determinação dos instantes ótimos para inspeção e manutenção preventiva e, simultaneamente, o número ótimo de inspeções e manutenções preventivas até à substituição completa do sistema.

Para uma melhor orientação do leitor, seguidamente é apresentada a nomenclatura utilizada no modelo.

Nomenclatura do modelo

a	Fator de ajustamento ($a > 1$) - representa o efeito do desgaste (devido à ocorrência do modo de falha do tipo II) na ocorrência do modo de falha tipo I
$C(T, N)$	Custo esperado de manutenção por unidade de tempo (u.t.), como uma função de T e de N , em unidades monetárias (u.m.)
$C_C(T, N)$	Custo esperado de manutenção por ciclo de funcionamento, como uma função de T e de N , em u.m.
c_{d1}	Custo médio da não deteção do modo de falha tipo I, em u.m.
c_{d2}	Custo médio da não deteção do modo de falha tipo II, em u.m.
c_{m1}	Custo médio da reparação mínima do modo de falha tipo I, em u.m.
c_{m2}	Custo médio da reparação mínima do modo de falha tipo II, em u.m.
c_p	Custo médio de inspeção e manutenção preventiva, em u.m.
c_r	Custo médio da substituição do sistema, em u.m.
c_u	Custo médio da indisponibilidade do sistema, em u.m.
N	Número de inspeções e manutenções preventivas entre duas substituições sucessivas

N^*	Número ótimo de inspeções e manutenções preventivas entre duas substituições sucessivas
$N_T(k)$	Número esperado de falhas entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas
$N_2(k(T+\tau))$	Número esperado de falhas do modo de falha tipo II no intervalo $[0, k(T+\tau)]$
p	Probabilidade de uma falha ser detetada imediatamente após a sua ocorrência
$r_{1,0}(t)$	Função de risco do modo de falha tipo I para um sistema novo
$r_{1,k}(t)$	Função de risco do modo de falha tipo I no instante t entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas
$r_2(t)$	Função de risco do modo de falha tipo II no instante t
$r_k(t)$	Função de risco do sistema no instante t entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas
$R_{1,k}(t)$	Função de fiabilidade do modo de falha tipo I no instante t entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas
$R_2(t)$	Função de fiabilidade do modo de falha tipo II no instante t
$R_k(t)$	Fiabilidade do sistema no instante t entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas
T	Período de inspeção e manutenção preventiva, em u.t.
T^*	Período ótimo de inspeção e manutenção preventiva, em u.t.
τ	Tempo esperado de indisponibilidade devido às ações de inspeção e manutenção preventiva e substituição, em u.t.
ρ_{k+1}	Fator de melhoria da fiabilidade do sistema, alcançada com a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva
γ_{k+1}	Fator de melhoria da função de risco do sistema, alcançado com a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva

4.2 O Modelo

4.2.1 Descrição da política de manutenção

Um *ciclo de funcionamento* é definido como o intervalo de tempo entre duas substituições completas do sistema, isto é, o ciclo de funcionamento tem a duração $N(T+\tau)$, onde τ representa o tempo esperado de indisponibilidade devido a ações de manutenção preventiva e substituições.

Nos instantes $kT+(k-1)\tau$ ($k=1, 2, \dots, N-1$), de um determinado ciclo, é realizada uma inspeção e uma manutenção preventiva ao sistema. A inspeção é perfeita e é o único modo de detecção das falhas não imediatamente reveladas (que ocorrem com probabilidade $1-p$). Concluída esta tarefa, e no caso de a inspeção ter detetado uma falha, realiza-se uma reparação mínima e, de seguida, procede-se a uma manutenção preventiva ao sistema. É importante notar que cada manutenção preventiva tem duração τ . Deste modo, o novo período de funcionamento, de duração T , apenas inicia após cada período de indisponibilidade τ . A manutenção preventiva é considerada imperfeita no sentido em que pode apenas reduzir a função de risco do modo de falha tipo I, mas não altera a função de risco do modo de falha tipo II. Remover a degradação deste modo de falha é somente possível fazendo a substituição completa do sistema, que restitui o sistema à condição AGAN. Assim, nos instantes $NT+(N-1)\tau$, $N=1, 2, \dots$, o sistema é substituído.

Acresce referir que sempre que uma falha é detetada (quer de forma imediata, quer na inspeção periódica seguinte), é levada a cabo uma reparação mínima. Esta ação de manutenção restitui o sistema a uma condição de tão mau como estava imediatamente antes da ocorrência da falha.

Neste modelo, é assumida a existência de custos de manutenção referentes a inspeções e manutenções preventivas, reparações mínimas e substituições, custos associados a não deteções imediatas das falhas e custos de indisponibilidades.

Note-se, ainda, que:

- Todos os custos envolvidos são valores positivos. Em particular, assume-se que o custo de cada manutenção preventiva, c_p , é inferior ao custo de uma substituição, c_r .
- A duração das inspeções/manutenções preventivas e das substituições do sistema são variáveis aleatórias, ambas com média τ .
- A duração da reparação mínima é considerada negligenciável quando comparada com a duração da manutenção preventiva.

Neste contexto, as reparações mínimas levadas a cabo assumem-se instantâneas, constituindo, assim, ações de manutenção muito simples, sem qualquer desmontagem

ou abertura do equipamento, tais como uma simples substituição de um consumível, que pode ser feita pelo utilizador do sistema.

A Figura 4.1 ilustra os custos envolvidos por ciclo de funcionamento.

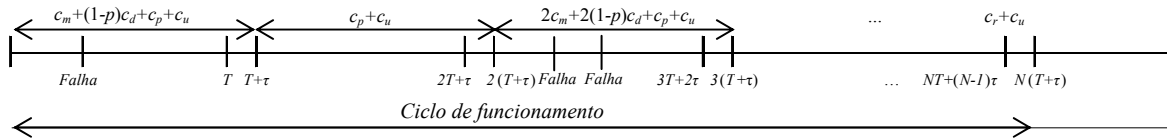


Figura 4.1 Exemplo esquemático de um ciclo de funcionamento.

O objetivo da análise que se segue é o de determinar o período de inspeção e manutenção preventiva (T) e, simultaneamente, o número de inspeções e manutenções preventivas (N) entre substituições completas do sistema, que minimizam o custo total de manutenção por unidade de tempo.

4.2.2 Modelação das falhas do sistema

Considera-se, então, um sistema com dois modos de falha dependentes, que podem ser caracterizados em termos de funções de risco. A função de risco do modo de falha tipo I depende do número de falhas de tipo II ocorridas no sistema até à inspeção anterior.

Assumam-se, para a modelação dos dois modos de falhas do sistema, os seguintes pressupostos:

- 1) Antes da primeira manutenção preventiva, o modo de falha tipo I ocorre segundo um processo não homogéneo de Poisson (NHPP), $\{N_1(t), t \geq 0\}$, com função de risco $r_{1,0}(t)$ e função de risco acumulada dada por:

$$H_1(t) = \int_0^t r_{1,0}(u) du, \quad t \geq 0 \quad (4.1)$$

Assume-se que $r_{1,0}(t)$ é contínua, crescente em t e que $r_{1,0}(0) = 0$.

- 2) O modo de falha tipo II ocorre segundo um processo não homogéneo de Poisson, $\{N_2(t), t \geq 0\}$, com função de risco $r_2(t)$ e função de risco acumulada dada por:

$$H_2(t) = \int_0^t r_2(u) du, \quad t \geq 0 \quad (4.2)$$

Assume-se que $r_2(t)$ é contínua e estritamente crescente em cada intervalo de tempo onde não são realizadas manutenções preventivas e que $r_2(0)=0$.

- 3) O modo de falha tipo II afeta a função de risco do modo de falha tipo I do seguinte modo:

$$r_{1,k}(t) = r_{1,0}(t - k(T + \tau)) a^{N_2(k(T+\tau))} \quad (4.3)$$

com $k(T + \tau) \leq t < (k+1)T + k\tau$, onde $N_2(k(T+\tau))$ representa o número de falhas do modo de falha tipo II no intervalo $[0, k(T+\tau)]$ e $r_{1,0}(t)$ a função de risco do modo de falha tipo I para um sistema novo. O fator de ajustamento $a^{N_2(k(T+\tau))}$, $a > 1$, representa o efeito do desgaste no sistema (devido à ocorrência de modos de falha tipo II) na ocorrência de modos de falha tipo I e pode ser determinado pelo histórico das ocorrências ou pela experiência de especialistas.

- 4) Durante as inspeções/manutenções preventivas e as substituições, o sistema não está operacional. Considera-se que não ocorre nenhum modo de falha nestes estados do sistema, tal como em Wu e Clements-Croome (2005).

Segundo o pressuposto 4, a função de risco do sistema durante as ações de manutenção preventiva e as substituições é zero. Isto significa que, após cada manutenção preventiva, no instante $k(T+\tau)$ de um dado ciclo, a função de risco do sistema é exatamente igual à função de risco do modo de falha tipo II imediatamente antes da manutenção preventiva ser executada, isto é, no instante $kT+(k-1)\tau$ (Figura 4.2).

Assim, a função de risco do modo de falha tipo II, referida no pressuposto 2, pode ser redefinida como:

$$r_2(t - k\tau), \quad t \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.4)$$

Conseqüentemente, a função definida pela Eq. (4.4) é uma função contínua e estritamente crescente em t .

Assim, pelas equações (4.3) e (4.4), a função de risco do sistema no instante t , entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas, $r_k(t)$, é, então, obtida por:

$$r_k(t) = r_{1,k}(t) + r_2(t - k\tau) \quad (4.5)$$

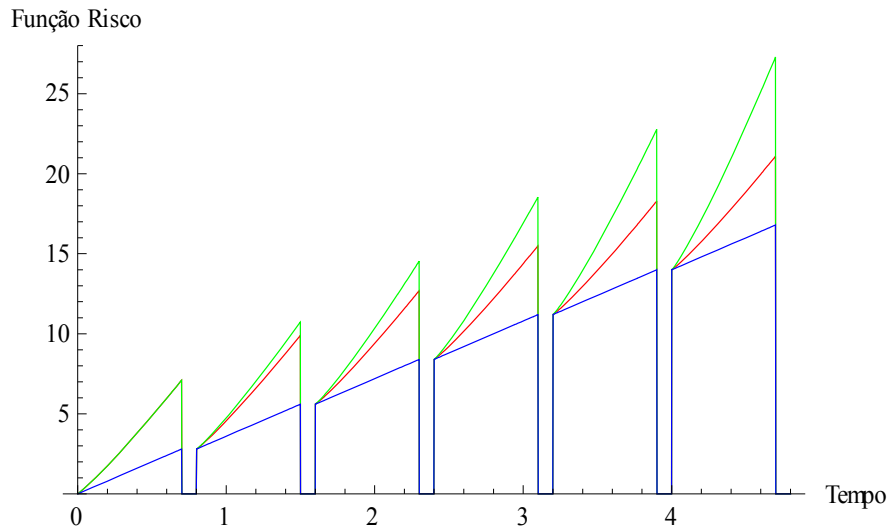


Figura 4.2 Exemplo da função de risco do sistema como uma função do tempo, para $T=0.7$ e $\tau=0.1$ unidades de tempo.

Na Figura 4.2, a função a verde representa a função de risco do sistema para $a=1.2$. A função a azul representa a função de risco do modo de falha tipo II. A função a vermelho representa a função de risco do sistema se $a=1$.

4.2.3 Interação dos modos de falha

As ações de manutenção preventiva são imperfeitas por duas razões: 1) a manutenção preventiva não afeta a função de risco do modo de falha tipo II, e 2) o desgaste acumulado, devido à ocorrência de modos de falha tipo II, afeta a função de risco do modo de falhas tipo I (pressuposto 3). Este desgaste acumulado não é eliminado pelas ações de manutenção preventivas levadas a cabo periodicamente e manifesta-se através da constante a . Se $a=1$, os modos de falha tipo I e tipo II são independentes. No entanto, se $a>1$, após sucessivas manutenções preventivas, a função de risco do modo de falha tipo I, definida pela Eq. (4.3), é estocástica. De facto, desde a inspeção subsequente à ocorrência da primeira falha de tipo II, a intensidade da ocorrência do modo de falha tipo I é influenciada por esse processo externo. Assim, essa intensidade torna-se um processo aleatório.

Similarmente a Castro (2008), vão ser aplicados alguns resultados da Teoria do Processo Estocástico de Poisson Duplo, também conhecido como Processo de Cox (nome do estatístico Sir David Cox). Basicamente, o processo de Cox é uma generalização natural do processo de Poisson, com a intensidade da ocorrência dos eventos estocástica (a intensidade em si é um processo estocástico). As propriedades gerais desta teoria podem ser encontradas em detalhe em Grandell (1976).

Definição 4.1

Dá-se o nome de *medida aleatória* a um processo aleatório não decrescente $\Lambda(t)$, $t \geq 0$, tal que $\Lambda(0)=0$ e $\Lambda(t) < \infty$ ($0 < t < \infty$).

Esta medida aleatória, agora definida de modo genérico, foi na Secção 2.6.1 definida como o número esperado de ocorrências de um processo de Poisson.

Definição 4.2

Seja $\Lambda(t)$ uma medida aleatória e $N_{hpp}(t)$ um processo homogéneo de Poisson. Então, o processo $N(t) = N_{hpp}(\Lambda(t))$ é chamado processo estocástico de Poisson duplo ou processo de Cox. Diz-se que o processo de Cox $N(t)$ é controlado pelo processo $\Lambda(t)$, ou que o processo $\Lambda(t)$ controla o processo de Cox $N(t)$.

Na secção seguinte, considera-se que o número de falhas de tipo I, entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima manutenções preventivas, é um processo de Cox controlado pelo processo $\Lambda_k(t)$, que traduz a função de risco acumulada do modo de falha tipo I no intervalo $[k(T+\tau), t]$, com $k(T+\tau) \leq t < (k+1)T+k\tau$ ($k=0,1,2,\dots$).

Propriedade 4.1

Se $\{N(t), t \geq 0\}$ é um processo de Cox controlado pelo processo $\Lambda(t)$, a função densidade de probabilidade é obtida por:

$$P[N(t) = n] = E \left[\frac{1}{n!} \Lambda(t)^n e^{-\Lambda(t)} \right], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

Aplicações desta teoria podem ser encontradas em Lai e Chen (2006), Lai (2007) e Lai (2009), no sentido da modelação da interação das funções de risco dos componentes de um sistema.

4.2.4 Número esperado de falhas

Pela Eq. (4.3), a medida aleatória em t , para $k(T+\tau) \leq t < (k+1)T+k\tau$ ($k=0,1,2,\dots$), vem:

$$\Lambda_k(t) = \int_{k(T+\tau)}^t r_{1,k}(u) du \quad (4.7)$$

ou seja,

$$\Lambda_k(t) = \int_{k(T+\tau)}^t r_{1,0}(u - k(T+\tau)) a^{N_2(k(T+\tau))} du \quad (4.8)$$

isto é,

$$\Lambda_k(t) = a^{N_2(k(T+\tau))} H_1(t - k(T+\tau)) \quad (4.9)$$

Pelas equações (4.6) e (4.9), e denotando por $N_1(t)$ o número de falhas de tipo I no intervalo $[0,t]$, obtém-se:

$$P[N_1((k+1)T+k\tau) - N_1(k(T+\tau)) = n] = E \left[\frac{1}{n!} \left(a^{N_2(k(T+\tau))} H_1(T) \right)^n e^{-a^{N_2(k(T+\tau))} H_1(T)} \right],$$

$$n=0,1,2,\dots \quad (4.10)$$

Pela Eq. (4.4), e sendo $N_2(t)$ um processo não homogéneo de Poisson atendendo também à Eq. (2.13), obtém-se:

$$P[N_2(k(T+\tau)) = z] = \frac{H_2(kT)^z}{z!} e^{-H_2(kT)}, \quad z=0,1,2,\dots \quad (4.11)$$

Donde, a Eq. (4.10) vem:

$$P[N_1((k+1)T+k\tau) - N_1(k(T+\tau)) = n] = \frac{H_1(T)^n}{n!} \sum_{z=0}^{\infty} \left[\Pr(N_2(k(T+\tau)) = z) \cdot \left(a^{nz} e^{-a^z H_1(T)} \right) \right] \quad (4.12)$$

ou seja,

$$P[N_1((k+1)T+k\tau) - N_1(k(T+\tau)) = n] = \frac{H_1(T)^n}{n!} \sum_{z=0}^{\infty} \left[\frac{(H_2(kT))^z}{z!} e^{-H_2(kT)} \cdot (a^{nz} e^{-a^z H_1(T)}) \right] \quad (4.13)$$

Logo, a Eq. (4.10) é dada por:

$$P[N_1((k+1)T+k\tau) - N_1(k(T+\tau)) = n] = \frac{H_1(T)^n}{n!} e^{-H_2(kT)} \sum_{z=0}^{\infty} \frac{(a^n H_2(kT))^z}{z!} e^{-a^z H_1(T)} \quad (4.14)$$

Então, pela Eq. (4.14), o número esperado de falhas de tipo I, entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima manutenções preventivas, num dado ciclo, vem:

$$\begin{aligned} E[N_1(k(T+\tau), (k+1)T+k\tau)] &= \sum_{n=0}^{\infty} n P[N_1((k+1)T+k\tau) - N_1(k(T+\tau)) = n] \\ &= H_1(T) e^{(a-1)H_2(kT)}, \quad k=0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (4.15)$$

Assim, usando as equações (4.4) e (4.15), o número esperado de falhas (de tipo I e de tipo II) entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima manutenções preventivas, num dado ciclo, é dado por:

$$N_T(k) = \begin{cases} H_1(T) e^{(a-1)H_2(kT)} + \int_{k(T+\tau)}^{(k+1)T+k\tau} r_2(u-k\tau) du, & \text{se } k(T+\tau) \leq t < (k+1)T+k\tau \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad k=0,1,2,\dots \quad (4.16)$$

Para um $T > 0$ fixo e considerando a monotonia de $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t-k\tau)$ (ambas as funções são crescentes em t), a função $N_T(k)$, que representa o número esperado de falhas do sistema entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima manutenções preventivas, é crescente em k , para $a > 1$. Isto significa que a melhoria da fiabilidade, devido a ações de manutenção preventiva, decresce à medida que aumenta o número de manutenções preventivas. Este facto justifica a substituição do sistema após ter sido realizado um determinado número de inspeções e manutenções preventivas.

4.2.5 Fiabilidade do sistema

Pela Eq. (2.5) é possível verificar que a função fiabilidade do sistema no instante t , entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas, $R_k(t)$, é definida pela seguinte expressão:

$$R_k(t) = \exp\left\{-\left(H_1(t - k(T + \tau))\alpha^{H_2(kT)} + H_2(t - k\tau)\right)\right\} \quad (4.17)$$

ou, de modo equivalente, por

$$R_k(t) = \exp\left\{-H_1(t - k(T + \tau))\alpha^{H_2(kT)}\right\} \times \exp\left\{-H_2(t - k\tau)\right\} = R_{1,k}(t) \times R_2(t) \quad (4.18)$$

onde $R_{1,k}(t)$ e $R_2(t)$ representam as funções de fiabilidade no instante t dos modos de falha tipo I e tipo II, respetivamente, entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima inspeções e manutenções preventivas. Claramente, esta expressão para a fiabilidade evidencia um sistema com dois componentes em série, inspirando, assim, a aplicabilidade do modelo, também, a sistemas com este tipo de estrutura.

4.2.6 Efeitos das atividades de manutenção preventiva

4.2.6.1 Análise dos efeitos das manutenções preventivas na função de risco

Pelas equações (4.3) e (4.4), sabe-se que a função de risco do sistema num instante t , entre a k -ésima e a $(k+1)$ -ésima manutenções preventivas, $r_k(t)$, é a seguinte:

$$r_k(t) = r_{1,0}(t - k(T + \tau))\alpha^{H_2(k(T+\tau))} + r_2(t - k\tau) \quad (4.19)$$

Logo, a função de risco no instante imediatamente antes da $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, isto é, no instante $(k+1)T + k\tau$, é dada por:

$$r_k((k+1)T + k\tau) = r_{1,0}(T)\alpha^{H_2(k(T+\tau))} + r_2((k+1)T) \quad (4.20)$$

Analogamente, a função de risco do sistema num instante t , entre a $(k+1)$ -ésima e a $(k+2)$ -ésima manutenções preventivas, $r_{k+1}(t)$, vem:

$$r_{k+1}(t) = r_{1,0}(t - (k+1)(T + \tau))\alpha^{H_2((k+1)(T+\tau))} + r_2(t - (k+1)\tau) \quad (4.21)$$

pelo que a função de risco no instante imediatamente após a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, isto é, no instante $(k+1)(T+\tau)$, vem como:

$$r_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = r_{1,0}(0)a^{H_2((k+1)(T+\tau))} + r_2((k+1)T) \quad (4.22)$$

Pelo pressuposto 1, sabe-se que $r_{1,0}(0)=0$, donde

$$r_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = r_2((k+1)T) \quad (4.23)$$

A Eq. (4.23) mostra que a função de risco do sistema imediatamente após uma manutenção preventiva é igual à função de risco do modo de falha tipo II nesse instante. Isto significa que as ações de manutenção preventiva são perfeitas para o modo de falha tipo I e mínimas para o modo de falha tipo II.

O fator melhoria da função de risco, γ_{k+1} , relativo ao sistema, alcançado com a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, é definido por

$$\gamma_{k+1} = \frac{r_k((k+1)T+k\tau) - r_{k+1}((k+1)(T+\tau))}{r_k((k+1)T+kT)} \quad (4.24)$$

Donde, pelas equações (4.20) e (4.23), vem:

$$\gamma_{k+1} = \frac{r_{1,0}(T)a^{H_2(k(T+\tau))}}{r_{1,0}(T)a^{H_2(k(T+\tau))} + r_2((k+1)T)}$$

Isto é,

$$\gamma_{k+1} = \frac{r_{1,k}((k+1)T+k\tau)}{r_k((k+1)T+k\tau)} \quad (4.25)$$

onde $r_{1,k}((k+1)T+k\tau)$ e $r_k((k+1)T+k\tau)$ representam as funções de risco do modo de falhas tipo I e de todo o sistema, respetivamente, no instante $(k+1)T+k\tau$.

A melhoria relativa da função de risco do sistema, advinda da $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, consiste, em termos práticos, na extração da função de risco dos modos de falha tipo I, já “empobrecida” no final de cada período de funcionamento T . De facto, as ações de manutenção preventiva para esses modos de falha são perfeitas.

Pela Eq. (4.24), a função de risco no instante imediatamente após a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva pode, também, ser escrita como

$$r_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = r_k((k+1)T+k\tau) - \gamma_{k+1}r_k((k+1)T+k\tau) \quad (4.26)$$

Ou seja,

$$r_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = (1 - \gamma_{k+1}) \cdot r_k((k+1)T+k\tau) \quad (4.27)$$

O fator de melhoria, tal como definido na Secção 3.3.4.4, deve na Eq. (4.27) ser entendido como $(1-\gamma_{k+1})$.

Obviamente, espera-se que $r_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = r_2((k+1)T)$, tal como obtido em (4.23).

De facto, após uma qualquer manutenção preventiva, a função de risco dos modos de falha tipo II permanece inalterada.

4.2.6.2 Análise dos efeitos das manutenções preventivas na função de fiabilidade

Um estudo análogo pode ser feito relativamente à fiabilidade do sistema.

Pela Eq. (4.17), a função fiabilidade é dada por:

$$R_k(t) = \exp\left\{-\left(H_1(t-k(T+\tau))\alpha^{H_2(kT)} + H_2(t-k\tau)\right)\right\} \quad (4.28)$$

para $k=0,1,2,\dots$ e $k(T+\tau) \leq t < (k+1)T+k\tau$.

Assim, o fator de melhoria da fiabilidade do sistema, ρ_{k+1} , alcançada com a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, num dado ciclo, é definido por

$$\rho_{k+1} = \frac{R_k((k+1)T+k\tau) - R_{k+1}((k+1)(T+\tau))}{R_k((k+1)T+k\tau)} \quad (4.29)$$

para $k=0,1,2,\dots, N-1$.

Note-se que $R_k((k+1)T+k\tau)$ representa a fiabilidade do sistema no instante $(k+1)T+k\tau$ (até este instante, k ações de manutenção preventiva foram executadas) e $R_{k+1}((k+1)(T+\tau))$ representa a fiabilidade do sistema no instante $(k+1)(T+\tau)$, imediatamente após a $(k+1)$ -ésima manutenção preventiva, de duração τ .

Atendendo à Eq. (4.17), a Eq. (4.29) toma a forma:

$$\rho_{k+1} = \frac{\left(e^{-H_1(T)a^{H_2(kT)}} - 1 \right) e^{-H_2((k+1)T+\tau)}}{e^{-H_1(T)a^{H_2(kT)}} e^{-H_2((k+1)T)}} \quad (4.30)$$

Logo, a Eq. (4.29) fica:

$$\rho_{k+1} = \frac{e^{-H_1(T)a^{H_2(kT)}} - 1}{e^{-H_1(T)a^{H_2(kT)}}} = 1 - e^{H_1(T)a^{H_2(kT)}} \quad (4.31)$$

No instante $(k+1)(T+\tau)$ acabou de ser realizada uma inspeção preventiva que, como se sabe, é perfeita para os modos de falha tipo I e mínima para os modos de falha tipo II, ou seja,

$$R_{k+1}((k+1)(T+\tau)) = (1 - \rho_{k+1}) \cdot R_k((k+1)T + k\tau) = R_2((k+1)T) \quad (4.32)$$

No entanto, pela primeira derivada em ordem a k da função definida pela Eq. (4.31), obtém-se:

$$\frac{\partial \rho_{k+1}}{\partial k} = -T \ln(a) H_1(T) r_2(kT) a^{H_2(kT)} e^{H_1(T)a^{H_2(kT)}} \quad (4.33)$$

Como $H_1(t)$ e $H_2(t)$ são funções positivas e crescentes, pois $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t-k\tau)$ são funções não negativas e crescentes, e $a > 1$, a derivada definida na Eq. (4.33) é menor do que zero. Consequentemente, o fator de melhoria da fiabilidade, definido pela Eq. (4.29), é estritamente decrescente em k . Mais uma vez, e em conformidade com a análise realizada à função definida em (4.16), é fundamentada a necessidade de se proceder a uma substituição do sistema após um número finito de manutenções preventivas.

4.2.7 Análise do custo da política de manutenção

Um ciclo de funcionamento é definido como o intervalo de tempo entre duas renovações consecutivas totais do sistema, isto é, o ciclo de funcionamento tem a duração $N(T+\tau)$.

O custo esperado de manutenção por ciclo de funcionamento engloba:

- Custo de substituição do sistema, c_r
- Custo esperado de todas as reparações do modo de falhas tipo I durante o ciclo de funcionamento, $c_{m1}E[N_1]$
- Custo esperado de todas as reparações do modo de falhas tipo II durante o ciclo de funcionamento, $c_{m2}E[N_2]$
- Custo esperado de todas as inspeções e manutenções preventivas ao sistema durante o ciclo de funcionamento, $(N-1)c_p$
- Custo esperado das indisponibilidades, devidas a inspeções e manutenções preventivas e a substituição, durante o ciclo de funcionamento, Nc_u
- Custo esperado de todas as não deteções do modo de falhas tipo I durante o ciclo de funcionamento, $c_{d1}E[N_1]$
- Custo esperado de todas as não deteções do modo de falhas tipo II durante o ciclo de funcionamento, $c_{d2}E[N_2]$

em que $E[N_1]$ e $E[N_2]$ representam, respetivamente, o número esperado de falhas de tipo I e o número de falhas de tipo II, por ciclo de funcionamento. A restante nomenclatura associada a este modelo de custo é apresentada no início do capítulo.

Assim, propõe-se que o custo esperado de manutenção por unidade de tempo, doravante designado por custo de manutenção, possa ser dado por:

$$C(T, N) = p \left(\frac{c_{m1}E[N_1] + c_{m2}E[N_2] + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \right) + (1-p) \left(\frac{(c_{m1} + c_{d1})E[N_1] + (c_{m2} + c_{d2})E[N_2] + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \right) \quad (4.34)$$

Usando a função definida em (4.16), o custo de manutenção, $C(T, N)$, definido através da Eq. (4.34), pode ser reescrito como:

$$C(T, N) = \frac{c_1 H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} + c_2 H_2(NT) + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \quad (4.35)$$

onde $c_1 = c_{m1} + (1-p)c_{d1}$ e $c_2 = c_{m2} + (1-p)c_{d2}$.

Objetivamente, com a utilização do modelo de manutenção proposto, pretende-se a determinação dos valores T e N que minimizam a função $C(T, N)$, definida em (4.35). No entanto, a otimização simultânea dos valores das variáveis T e N é muito difícil de se conseguir por via analítica, exceto em casos especiais. Nas secções seguintes apresenta-se uma alternativa, já utilizada por diversos autores (Badía e Berrade, 2009a; Castro, 2008; Zequeira e Berenguer, 2005; e Nakagawa, 1986), para reduzir consideravelmente a procura dos valores ótimos para um caso finito.

4.2.7.1 Período de inspeção ótimo

Nesta secção, analisa-se a otimização do período de inspeção, T , dado um valor fixo de N . A Figura 4.3 mostra alguns exemplos da função que define o custo total de manutenção por unidade de tempo, expressa na Eq. (4.35), para diferentes valores de N fixos.

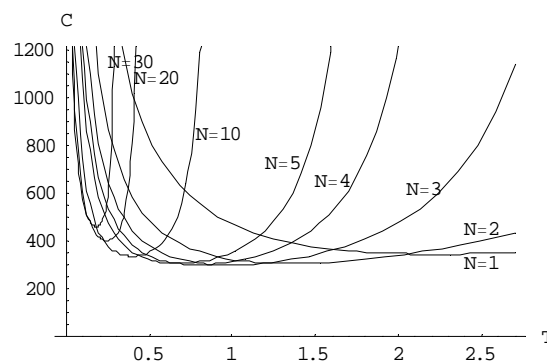


Figura 4.3 Exemplos do custo de manutenção, definido na Eq. (4.35), como uma função de T , para diferentes valores de N fixos.

A Figura 4.3 sugere a existência de um único mínimo T . De facto, fixando o valor do número de manutenções preventivas a efetuar ao sistema, é possível obter o período de tempo ótimo entre manutenções preventivas, como mostra o Teorema 4.1.

Teorema 4.1

Seja $C(T, N)$ a função definida na Eq. (4.35). Para N fixo, o valor de T que minimiza $C(T, N)$:

- i) existe, se $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t-k\tau)$ são funções contínuas;
- ii) é único e é obtido para o valor de T que verifica a seguinte equação:

$$c_1 \left[\sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} (r_{1,0}(T)(T+\tau) + H_1(T)(a-1)k(T+\tau)r_2(kT) - H_1(T)) \right] + \quad (4.36)$$

$$+ c_2 [(T+\tau)Nr_2(NT) - H_2(NT)] = c_r + (N-1)c_p + Nc_u$$

Demonstração:

i) A primeira derivada do custo de manutenção, $C(T, N)$, dada pela Eq. (4.35), em ordem a T , é dada pela seguinte condição:

$$\frac{\partial}{\partial T} C(T, N) = \frac{1}{N(T+\tau)^2} \left[(T+\tau) \frac{\partial}{\partial T} C_c(T, N) - C_c(T, N) \right] \quad (4.37)$$

onde $C_c(T, N)$ representa o custo esperado de manutenção por ciclo de funcionamento.

Basicamente, corresponde ao numerador da função definida na Eq. (4.35).

Então, o valor ótimo de $T > 0$ é a solução da seguinte equação:

$$(T+\tau) \frac{\partial}{\partial T} C_c(T, N) - C_c(T, N) = 0 \quad (4.38)$$

onde

$$\frac{\partial}{\partial T} C_c(T, N) = c_1 \left[r_{1,0}(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} + H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} k(a-1)r_2(kT) e^{(a-1)H_2(kT)} \right] + c_2 Nr_2(NT) \quad (4.39)$$

Seja $A(T, N)$ o lado esquerdo da Eq. (4.38).

Tem-se que:

$$\lim_{T \rightarrow 0} A(T, N) = -c_r - (N-1)c_p - Nc_u < 0 \quad \text{e} \quad \lim_{T \rightarrow \infty} A(T, N) = \infty \quad (4.40)$$

Além disso, como $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t-k\tau)$ são funções contínuas, então, para um N fixo, $A(T, N)$ é, também, uma função contínua.

Logo, pelo Teorema de Bolzano, existe pelo menos um valor de T tal que $A(T, N) = 0$ e, conseqüentemente, existe um valor de T que minimiza $C(T, N)$.

ii) Considere-se, novamente, $A(T, N)$ o lado esquerdo da Eq. (4.38).

Sabe-se que:

$$\frac{\partial}{\partial T}[A(T, N)] = \frac{\partial}{\partial T} C_c(T, N) + (T + \tau) \frac{\partial^2}{\partial T^2} C_c(T, N) - \frac{\partial}{\partial T} C_c(T, N), \quad T > 0$$

isto é,

$$\frac{\partial}{\partial T}[A(T, N)] = (T + \tau) \frac{\partial^2}{\partial T^2} C_c(T, N), \quad T > 0 \quad (4.41)$$

Pela Eq. (4.39), sabe-se que:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial T^2} C_c(T, N) = c_1 \left[\sum_{k=0}^{N-1} (r'_{1,0}(T) + 2r_{1,0}(T)(a-1)kr_2(kT) + \right. \\ \left. + H_1(T)(a-1)k^2(r_2'(kT) + (a-1)r_2^2(kT)))e^{(a-1)H_2(kT)} \right] + c_2 N^2 r_2'(NT) \end{aligned} \quad (4.42)$$

Como $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t-k\tau)$ são funções não negativas e $r_{1,0}(t)$ é crescente em t e $r_2(t-k\tau)$ é estritamente crescente em t , tem-se que:

$$\frac{\partial^2}{\partial T^2} C_c(T, N) > 0 \quad (4.43)$$

Então,

$$\frac{\partial}{\partial T}[A(T, N)] > 0, \quad T > 0 \quad (4.44)$$

Logo, $A(T, N)$ é uma função estritamente crescente em T .

Provou-se, pela alínea i) do Teorema 4.1, que T^* existe. Sendo $A(T, N)$ uma função estritamente crescente em T , prova-se agora que T^* é único e é obtido para o valor de T que verifica a Eq. (4.38), isto é,

$$c_1 \left[\sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} (r_{1,0}(T)(T+\tau) + H_1(T)(a-1)k(T+\tau)r_2(kT) - H_1(T)) \right] + c_2 [(T+\tau)Nr_2(NT) - H_2(NT)] = c_r + (N-1)c_p + Nc_u$$

■

4.2.7.2 Valor ótimo de N

Nesta secção, tomando um valor fixo de T , analisa-se a otimização do número de inspeções e manutenções preventivas efetuadas entre duas substituições consecutivas do sistema. Concretamente, pretende-se provar (no Teorema 4.2) que, para um T fixo, o valor de N que minimiza a função custo $C(T, N)$ existe e é único. Para o efeito, é utilizada a aproximação de Nakagawa (1986).

Teorema 4.2

Seja $C(T, N)$ o custo esperado de manutenção por unidade de tempo definido na Eq. (4.35). Para um T fixo, existe e é único um valor de N que minimiza $C(T, N)$.

Demonstração:

Pela aproximação usada em Nakagawa (1986), para estimar o valor ótimo de N , verifica-se a seguinte condição:

$$C(T, N+1) \geq C(T, N) \quad (4.45)$$

Ou seja, pela definição de $C(T, N)$ expressa na Eq. (4.35),

$$c_1 H_1(T) \left[N e^{(a-1)H_2(NT)} - \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} \right] + c_2 [NH_2((N+1)T) - (N+1)H_2(NT)] \geq c_r - c_p \quad (4.46)$$

Seja $B(T, N)$ o lado esquerdo da desigualdade (4.46).

Se o valor ótimo de N é maior do que 1, verifica-se, também, a seguinte condição:

$$C(T, N-1) > C(T, N) \quad (4.47)$$

O que, pela definição de $C(T, N)$ expressa na Eq. (4.35), vem:

$$c_1 H_1(T) \left[(N-1)e^{(a-1)H_2((N-1)T)} - \sum_{k=0}^{N-2} e^{(a-1)H_2(kT)} \right] + c_2 [(N-1)H_2(NT) - NH_2((N-1)T)] < c_r - c_p \quad (4.48)$$

Seja $B(T, N-1)$ o lado esquerdo da desigualdade (4.48).

Pelas desigualdades (4.45) e (4.47), verifica-se que o valor ótimo de N deve satisfazer a seguinte condição:

$$B(T, N) \geq c_r - c_p > B(T, N-1) \quad (4.49)$$

Segue-se que:

$$\begin{aligned} B(T, N) - B(T, N-1) &= \\ &= N \left[c_1 H_1(T) \left(e^{(a-1)H_2(NT)} - e^{(a-1)H_2((N-1)T)} \right) + c_2 \left(\int_{NT}^{(N+1)T} r_2(t) dt - \int_{(N-1)T}^{NT} r_2(t) dt \right) \right] > 0 \end{aligned} \quad (4.50)$$

Logo, para um T fixo, $B(T, N)$ é estritamente crescente em N . Assim, para um T fixo, existe um valor de N que satisfaz a condição (4.49). Além disso, sendo $r_2(t-k\tau)$ estritamente crescente, a igualdade na condição (4.45) nunca se verifica. Assim, o valor de N que verifica a condição (4.49) existe e é único. ■

4.2.7.3 Algoritmo de estimação da política ótima

Com o objetivo da otimização simultânea de T e de N , isto é, da determinação da política ótima, recorre-se ao seguinte algoritmo, já antes proposto por Nakagawa (1986), Badía e Berrade (2009a) e Zequeira e Bérenguer (2005), que consiste essencialmente em determinar iterativamente T_N^* e T_{N+1}^* , começando em $N=1$ até encontrar o ponto de inflexão da função custo de manutenção definida na Eq. (4.35), ou seja:

1. Fazer $N=1$.
2. Determinar T_N^* e T_{N+1}^* .
3. Se $C(T_{N+1}^*, N+1) < C(T_N^*, N)$, então passar ao passo 4. Caso contrário, avançar para o passo 5.
4. Incrementar $N=N+1$ e retroceder ao passo 2.
5. Parar, considerando (T^*, N^*) a política ótima de manutenção.

Note-se, no entanto, que o algoritmo não garante um ótimo global. Contudo, analisar o problema de otimização em duas variáveis torna-se uma tarefa muito difícil e o algoritmo apresentado pode reduzir consideravelmente a busca dos valores ótimos para um caso finito.

4.3 Aplicação numérica

Nesta secção são dados alguns exemplos numéricos que ilustram a aplicabilidade do modelo desenvolvido no Capítulo 4.

Considere-se, então, a função que expressa o custo de manutenção por unidade de tempo, definida na Secção 4.2.7, pela Eq. (4.35).

A função custo assim definida é uma função contínua em que:

$$\lim_{T \rightarrow 0} C(T, N) = c_r + (N - 1)c_p + Nc_u$$

e

$$\lim_{T \rightarrow \infty} C(T, N) = \infty$$

Considere-se que as funções de risco do modo de falha tipo I (antes da primeira manutenção preventiva) e do modo de falha tipo II são distribuições de Weibull tais que $H_1(t) = \alpha t^\beta$ and $H_2(t) = \delta t^\lambda$. Então, $r_{1,0}(t) = \alpha \beta t^{\beta-1}$ e $r_2(t) = \delta \lambda t^{\lambda-1}$. Pelos pressupostos 1 e 2, definidos na Secção 4.2.2, as funções de risco $r_{1,0}(t)$ e $r_2(t)$ são funções contínuas e crescentes em t . Logo, pelas propriedades da distribuição de Weibull (exploradas na Secção 2.7), em particular pelas propriedades do seu parâmetro de forma, tem-se que $\beta > 1$ e $\lambda > 1$.

Sejam $\alpha=3$, $\beta=2.2$, $\delta=2$ e $\lambda=2$ os parâmetros das funções de risco associadas aos dois modos de falha. Assim, as funções de risco dos modos de falha tipo I e tipo II são, respetivamente, dadas por:

$$r_{1,0}(t) = 6.6t^{1.2} \text{ e } r_2(t) = 4t, \quad t \geq 0$$

e

$$H_1(t)=3t^{2.2} \text{ e } H_2(t)=2t^2.$$

Note-se que antes da primeira ação de manutenção preventiva, o modo de falha tipo I é mais frequente que o modo de falha tipo II.

Assumam-se os seguintes custos (em u.m.) associados ao modelo:

$$c_p=30, \quad c_{d1}=15 \quad c_{d2}=20, \quad c_r=400, \quad c_{m1}=10, \quad c_{m2}=15, \quad c_u=25$$

Foi considerado que, antes da primeira manutenção preventiva, o modo de falhas tipo I é mais frequente do que o modo de falhas tipo II. Assim, é realista assumir que: $c_{d1} < c_{d2}$ e $c_{m1} < c_{m2}$. Além disso, faz sentido que o custo de substituição seja mais elevado do que o custo de indisponibilidade (devido a ações de manutenção preventiva). Também parece ser consensual que o custo da substituição seja maior do que o custo da manutenção preventiva (este caso consta, inclusivamente, da descrição da política de manutenção). Uma vez que a manutenção preventiva foi descrita como uma tarefa mais complexa e com efeitos mais benéficos no sistema do que a reparação mínima, é razoável, também, considerar o custo da reparação mínima mais baixo do que o custo da manutenção preventiva.

Finalmente, sejam $p=0.9$ a probabilidade de uma qualquer falha ser detetada imediatamente após a sua ocorrência, $a=1.05$ o fator de ajustamento, e $\tau=0.01$ o tempo de indisponibilidade (em u.t.) devido a ações de manutenção preventiva e substituições.

Para os valores dos parâmetros descritos acima, a Figura 4.4 mostra o gráfico de $C(T,N)$, dada pela condição (4.35), para diferentes valores de N .

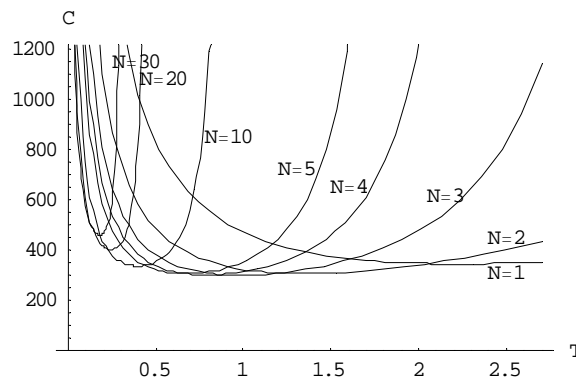


Figura 4.4 Custo de manutenção como uma função de T , para diferentes valores de N .

Considerando, como base, os valores dos parâmetros definidos, alguns resultados numéricos são, a seguir, apresentados. Assim, na Tabela 4.1, assumem-se variações dos valores dos parâmetros c_u , a e p e, na Tabela 4.2, variações de c_r , a e p .

Tabela 4.1 Política ótima e custo de manutenção mínimo para diferentes valores de c_u , considerando $a=1.05$ e $a=1.2$, e $p=0.5$ e $p=0.9$

c_u	a	p	T^*	N^*	N^*T^*	$C(T^*, N^*)$
5	1.05	0.5	0.66	4	2.62	357.4
		0.9	0.78	4	3.10	298.2
	1.2	0.5	0.71	3	2.13	375.0
		0.9	0.80	3	2.41	320.2
10	1.05	0.5	0.83	3	2.48	364.3
		0.9	0.98	3	2.94	303.6
	1.2	0.5	0.72	3	2.16	382.9
		0.9	1.17	2	2.35	325.9
15	1.05	0.5	0.84	3	2.52	370.3
		0.9	0.99	3	2.98	308.6
	1.2	0.5	0.73	3	2.18	389.7
		0.9	1.18	2	2.37	330.1
25	1.05	0.5	0.86	3	2.58	381.9
		0.9	1.02	3	3.05	318.5
	1.2	0.5	1.04	2	2.09	400.8
		0.9	1.2	2	2.4	338.4
50	1.05	0.5	1.21	2	2.41	407.8
		0.9	1.44	2	2.87	339.2
	1.2	0.5	1.08	2	2.16	424.1
		0.9	1.24	2	2.48	358.8

Pela análise da Tabela 4.1, verifica-se que o custo de manutenção mínimo por unidade de tempo, $C(T^*, N^*)$, cresce quando c_u cresce. No entanto, a duração do ciclo, N^*T^* , não é monótona e o número de manutenções preventivas por ciclo de funcionamento, N^* , decresce quando c_u cresce, como era, aliás, expectável.

Tabela 4.2 Política ótima e custo de manutenção mínimo para diferentes valores de c_r , considerando $a=1.05$ e $a=1.2$, e $p=0.5$ e $p=0.9$

c_r	a	p	T^*	N^*	N^*T^*	$C(T^*, N^*)$
100	1.05	0.5	1.04	1	1.04	225.1
		0.9	1.26	1	1.26	186.1
	1.2	0.5	1.04	1	1.04	225.1
		0.9	1.26	1	1.26	186.1
200	1.05	0.5	0.90	2	1.80	290.5
		0.9	1.08	2	2.17	241
	1.2	0.5	0.85	2	1.7	296.7
		0.9	0.99	2	1.99	248.5
300	1.05	0.5	1.04	2	2.07	341.6
		0.9	1.24	2	2.48	283.6
	1.2	0.5	0.96	2	1.91	351.4
		0.9	1.2	2	2.4	338.4
500	1.05	0.5	0.93	3	2.78	418.8
		0.9	1.09	3	3.27	349.8
	1.2	0.5	0.78	3	2.33	446.6
		0.9	1.34	2	2.67	416.5
800	1.05	0.5	0.86	4	3.44	512.6
		0.9	0.99	4	3.97	431.4
	1.2	0.5	0.86	3	2.59	566.7
		0.9	1.44	2	2.87	488

Pela Tabela 4.2, nota-se que o número de manutenções preventivas, N^* , num determinado ciclo, a duração do ciclo de funcionamento, N^*T^* , e o custo de manutenção mínimo por unidade de tempo, $C(T^*, N^*)$, crescem à medida que c_r cresce.

Verifica-se ainda que quando $N^*=1$, o número de ações de manutenção preventiva, a duração do ciclo e o custo mínimo por unidade de tempo são iguais tanto para $a=1.05$ como para $a=1.2$. Este facto é, aliás, verificado para qualquer valor de a que se considere, uma vez que o efeito do fator de ajustamento só começa após a primeira ação de manutenção preventiva.

Analisando, em ambas as tabelas, os diferentes valores da probabilidade de uma falha ser revelada de forma imediata, p , verifica-se que, independentemente do valor do fator

de ajustamento a , ou do custo de substituição c_r ou, ainda, da variação do custo de indisponibilidade c_u , para $p=0.9$, o número de manutenções preventivas levadas a cabo e a duração do ciclo de funcionamento são maiores do que quando $p=0.5$. Contudo, e como seria de esperar, o custo de manutenção ótimo é inferior quando a probabilidade de detetar uma falha imediatamente após a sua ocorrência é 0.9.

4.4 Síntese

Neste capítulo é proposto um novo modelo para a manutenção de um sistema tecnológico com dois modos de falha dependentes, que podem ser imediatamente revelados ou não.

Com a aplicação deste modelo pretende-se a determinação dos instantes ótimos para inspeção e manutenção preventiva e, simultaneamente, o número ótimo de inspeções e manutenções preventivas até à substituição completa do sistema.

De notar que, na construção do modelo, não foram assumidos pressupostos que, à partida, considerem simplificações analíticas significativas. Independentemente da complexidade das expressões matemáticas utilizadas, a preocupação primária prendeu-se exclusivamente com a aplicabilidade do modelo a contextos reais.

Pela facilidade de implementação em contextos reais, pressupõe-se que as inspeções e manutenções preventivas são levadas a cabo em intervalos de tempo periódicos e que o sistema é totalmente substituído finda a realização de um determinado número de inspeções e manutenções preventivas. As manutenções preventivas são imperfeitas, na medida em que deixam o sistema numa condição algures entre os níveis AGAN e ABAO, e são não instantâneas.

Apesar de o modelo proposto ser considerado realista e genérico, pressupõe o conhecimento absoluto de todos os parâmetros envolvidos, isto é, os parâmetros são tomados como valores rígidos ou determinísticos.

A modelação da incerteza dos parâmetros do modelo é considerada no capítulo seguinte.

5 Modelo Probabilístico-Difuso de Manutenção de um Sistema Tecnológico

Depois de realizada uma revisão bibliográfica sobre aplicações recentes da teoria dos conjuntos difusos em problemas de manutenção, este capítulo estende o capítulo anterior para um cenário no qual existe incerteza dos parâmetros. Esta incerteza é modelada utilizando conjuntos difusos (cujas noções elementares são introduzidas no Anexo A), o que introduz um fator adicional de complexidade de cálculo.

Para o efeito, neste capítulo analisam-se modos de propagação da incerteza difusa e apontam-se alguns aspetos relacionados com a tomada de decisão difusa, que assume um papel absolutamente essencial na perspetiva da gestão da manutenção.

O capítulo termina com uma breve aplicação numérica do modelo probabilístico-difuso desenvolvido, que ilustra a sua aplicabilidade em sistemas reais.

5.1 Introdução

O modelo de manutenção apresentado na Secção 4.2 do capítulo anterior incorpora vários parâmetros, nomeadamente parâmetros de fiabilidade, de custos de manutenção, de tempos de indisponibilidade, entre outros. Estes parâmetros foram considerados rígidos, ignorando a incerteza inerente, tantas vezes presente em estudos desta natureza, mas, no entanto, raramente tida em consideração.

A representação desta incerteza, relativa ao modelo de custos de manutenção discutido no Capítulo 4, é neste capítulo realizada com recurso aos conjuntos difusos, dado tratar-se essencialmente de incerteza de natureza não probabilística.

A Teoria dos Conjuntos Difusos, apresentada pela primeira vez por Zadeh (1965), é uma extensão à teoria clássica dos conjuntos, em que o grau de pertença de um elemento a um conjunto toma um valor no intervalo $[0, 1]$, em vez de 0 ou 1. Um conjunto difuso é uma classe de objetos em que não existe uma fronteira bem definida entre os objetos que pertencem à classe e os que não pertencem. São reconhecidas as potencialidades desta teoria para modelar a incerteza em situações de grande complexidade ou de escassez de dados, como acontece frequentemente em estudos de fiabilidade onde os parâmetros, tais como a função de risco, tempos de reparação, etc., não são conhecidos com exatidão. Quando, pelo contrário, existe muita informação acerca do problema, resultante de análises estatísticas, um modelo probabilístico é mais adequado para a modelação dessa incerteza.

O Anexo A apresenta os conceitos fundamentais sobre a teoria dos conjuntos difusos, elementares para a compreensão da análise das secções seguintes.

5.2 Aplicações da teoria dos conjuntos difusos em problemas de manutenção

A teoria dos conjuntos difusos tem vindo a aplicar-se em diversas áreas do conhecimento, assumindo relevância máxima na engenharia. No caso particular da Engenharia Industrial, as aplicações tornaram-se mais relevantes em meados dos anos oitenta. As vantagens da aplicação da teoria dos conjuntos difusos nesta área prendem-se, principalmente, com o facto de ser uma área da engenharia muito transversal.

A Engenharia Industrial não lida apenas com questões técnicas dos sistemas. Pelo contrário, ocupa-se do planeamento, melhoria e instalação de sistemas integrados de pessoas, materiais, informação, equipamentos e energia. Baseia-se em conhecimentos e técnicas especializadas das ciências matemáticas, físicas e sociais, juntamente com os princípios e métodos de análise e projeto de engenharia, para especificar, predizer e avaliar os resultados a serem obtidos por esses sistemas. Tem, portanto, incorporados, entre outros, problemas comportamentais, ergonómicos, organizacionais e económicos. Assim, a Engenharia Industrial acaba por ser uma área abrangente, cobrindo vertentes como o fabrico, a gestão do projeto, o controlo do processo industrial, o campo organizacional, a gestão financeira, o controlo de qualidade, a análise de risco, o planeamento da manutenção, a ergonomia, o controlo de inventários, a segurança, entre outros. Deste modo, a teoria dos conjuntos difusos, que foi motivada em larga medida pela necessidade de uma estrutura matemática mais expressiva para lidar com fatores humanos, tem indubitavelmente um grande impacto nesta área.

Os conjuntos difusos são convenientes, por exemplo, para estimar o tempo de vida útil de um equipamento. Parte desta informação é, em muitos casos, fornecida pelo fabricante. De facto, são as afirmações em linguagem corrente, na maior parte dos casos, a melhor forma de expressar o conhecimento do sistema. Contudo, essa informação é, por natureza, muito imprecisa, pelo que uma estimativa realista consiste sempre numa aproximação. Por exemplo, para estimar o tempo de vida de um equipamento, são muito comuns afirmações como a seguinte: “Sob condições operativas normais, o tempo de vida útil do equipamento ronda os x anos”. O termo “condições operativas normais” deve ser convenientemente expresso por uma coleção de conjuntos difusos, mais propriamente um por cada característica operacional (variável) que supostamente afeta o tempo de vida do equipamento. Por sua vez, o termo “ronda os x anos” é expresso por um número difuso cuja dispersão em torno do seu valor modal x indica o grau de não-especificidade da estimativa.

Na maioria das indústrias transformadoras, o sistema produtivo tem uma deterioração contínua. Pelo uso ou idade, surgem consequências tais como a corrosão, a fadiga e o desgaste acumulado. Wang e Tang (2009) classificam o estado do processo de produção como “in-control” ou “out-of-control”. Referem que, geralmente, um processo de produção inicia a produção num estado “in-control” e que, após um

período de tempo, devido à deterioração contínua, o processo pode passar para um estado “out-of-control”, que se traduz na produção de produtos não conformes e não conformidades no sistema que, inevitavelmente, necessitam ser rejeitados, reparados ou novamente produzidos, com os custos integrantes deste contexto. Nesta perspetiva, os autores investigam o tempo ótimo de produção, num processo de produção sujeito a deterioração, onde o tempo decorrido entre a mudança de estados do processo de produção é caracterizado como uma variável difusa, assim como os custos associados. Com vista à determinação do tempo ótimo de produção (“in-control”), desenvolvem uma expressão que representa o custo médio esperado por unidade de tempo e uma aproximação para a sua solução.

Ivezic *et al.* (2008) apresentam um modelo, para a avaliação do desempenho da confiança num sistema, com a utilização de conjuntos difusos. A fiabilidade, manutibilidade e o apoio à manutenção são os indicadores usados para uma análise profunda das condições técnicas do sistema, no que respeita ao projeto, construção, manutenção e logística. Além disso, o modelo pode ser, ainda, usado como uma ferramenta para a rápida estimativa da qualidade técnica do sistema, baseado nas estimativas e avaliações dos peritos em manutenção.

A aplicação da lógica difusa (Secção A.2.6 do Anexo A) no planeamento da manutenção tem trazido significativas contribuições no que respeita à apreensão de imprecisões e incertezas em dados relacionados com a manutenção em vários setores industriais. A motivação para a aplicação da lógica difusa no planeamento da manutenção prende-se com a necessidade de, através dos dados disponíveis da manutenção, tomar decisões fundamentadas, garantindo um elevado nível de fiabilidade do equipamento. Um sistema complexo com limitações e múltiplas funções com características imprecisas pode ser colmatado usando representações difusas. Estas, sustentando a otimização do sistema e uma utilização sensata dos recursos, contribuem para o crescente valor de uma organização (Oke e Charles-Owaba, 2006). De facto, numa área onde grande quantidade dos dados se processam rapidamente e onde existe uma dependência quase total dos registos históricos e da qualidade e experiência dos peritos e/ou engenheiros de manutenção, a lógica difusa tem vindo a desempenhar um papel de especial relevância no que respeita à delimitação da manutenção, fornecendo um apoio fundamental em áreas específicas, tais como: na

deteção de uma falha iminente ou quando o aparecimento de uma avaria súbita se torna mais rápido; na geração de dados úteis para ajudar o responsável da manutenção a alcançar a eficácia global do equipamento; na relação custo - eficácia das operações. Neste sentido, uma função de pertinência bem ajustada ao modelo difuso potencia o crescimento do desempenho global do sistema, através da avaliação da gestão do tempo, limitações dos recursos humanos, etc.. Assim, a atribuição de parâmetros adequados às funções do sistema podem ajudar na redução no custo total de produção e manutenção por unidade de tempo e, acima de tudo, obter medidas de desempenho que reflitam a incerteza intrínseca dos parâmetros do sistema/ modelo.

Labib *et al.* (1998) propõem um método que permite encontrar um critério de prioridade para a manutenção dos equipamentos constituintes de um sistema com recursos limitados de manutenção. O método segue dois passos: 1) obtenção do critério de prioridade para a manutenção pela identificação dos equipamentos com menos condições operativas e os seus defeitos; 2) utilização dos critérios, obtidos através de 1) *inputs* rígidos, numa lógica de controlo difusa, de modo a obter um modelo prescritivo para o tipo de ação de manutenção a executar.

Na sequência deste trabalho, Yuniarto e Labib (2006) definiram a frequência das falhas e o tempo para a sua reparação como sendo os *inputs* difusos. Assim, baseados na função de pertinência destes *inputs* e numa determinada base de regras desenvolvida pelo controlador, estes propõem um *output* (de um grupo de cinco), que traduz o método prescritivo de manutenção. Este trabalho estende o trabalho de Labib *et al.* (1998), no sentido em que para além de especificar o tipo de ação de manutenção, especifica também quando deverá ser realizada.

Ainda no sentido da gestão de prioridades de equipamentos para manutenção preventiva, Khanlari *et al.* (2008) apresentam um modelo que identifica, através de entrevistas aos peritos de manutenção da fábrica, seis variáveis difusas: sensibilidade da operação; tempo médio entre falhas; tempo médio de reparação; disponibilidade de peças necessárias; disponibilidade de pessoal de reparação; e carga de trabalho. O primeiro passo neste processo consiste na “fuzzificação” das variáveis. As variáveis são, então, transformadas em variáveis linguísticas. Neste caso, os valores das variáveis são definidas como *alto*, *médio* e *baixo*, tendo em conta os valores atribuídos

às variáveis. As funções de pertinência são determinadas, mais uma vez, a partir dos pontos de vista dos peritos acerca de cada tipo de variável.

Tal como Labib e Yuniarto (2006), Wolkenhauer (2001) defende que o apoio à decisão da atribuição de prioridades de equipamentos baseia-se, fundamentalmente, em dois critérios: o tempo de falha da máquina e a frequência das falhas. Nos dois trabalhos é assumido que o conhecimento base consiste em nove regras difusas (Figura 5.1).

		Tempo de falha		
		Baixo	Médio	Alto
Frequência de Falha	Baixo	Operate to	TPM: When?	Condition based
	Médio	TPM: Who?	Total Preventive	TPM: What?
	Alto	Skill Level	TPM:How?	Design Out

Figura 5.1 Regras difusas usadas na tomada de decisão das ações de manutenção preventiva (Fonte: Wolkenhauer, 2001)

Por exemplo, se uma máquina falha regularmente, mas o tempo que permanece inativa é relativamente pequeno, isto é, se o problema é resolvido rapidamente, então o operador deveria adquirir competências para, ele próprio, lidar com o problema, em vez de chamar a equipa de manutenção. Por outro lado, se uma máquina, quando falha, demora muito tempo a reparar, então deve ser monitorizada para que essas falhas não ocorram com tanta frequência.

O “teorema renovação-benefício” é a ferramenta fundamental para a obtenção de melhores estratégias de manutenção ou substituição ao menor custo (Popova e Wu, 1999). Os autores analisam uma política de substituição, em que a “recompensa/benefício” e os tempos de falha não são conhecidos com precisão, pelo que são modelados através de *variáveis aleatórias difusas* (no sentido de função mensurável de um espaço de probabilidades para um conjunto de números difusos, sendo o seu valor esperado descrito como um número difuso), tendo sido demonstrado

um teorema que apresenta o benefício médio difuso por unidade de tempo. Hong (2006) estende a investigação anterior no sentido em que também os intervalos entre renovações são modelados por variáveis difusas. Zhao *et al.* (2004), Zhao *et al.* (2007) e Shen *et al.* (2009) fazem um estudo semelhante, adotando, no entanto, um conceito diferente de *variável aleatória difusa* (introduzido por Liu (2002) e que descreve o conceito como uma função mensurável de um espaço de probabilidades para um conjunto de variáveis difusas, sendo o seu valor esperado definido como um operador de um valor escalar esperado), obtendo resultados bem diferentes dos produzidos em (Popova e Wu, 1999).

Segundo Sharma *et al.* (2009), a análise da fiabilidade de um sistema requer frequentemente a utilização de apreciações subjetivas e dados imprecisos e, como tal, a modelação do sistema é sempre aproximada. Procedem, então, a uma análise (quantitativa e qualitativa) de estimativas humanas, consequentemente vagas e imprecisas, considerando como difusas: a probabilidade de ocorrência de falha (medida por MTBF, através dos registos dos relatórios de manutenção); a gravidade da falha (medida, por exemplo, por MTTR); e a probabilidade de não deteção da falha (que depende de vários fatores, nomeadamente da disponibilidade do técnico de manutenção). Com o estudo desenvolvido, os autores admitem que os gestores/engenheiros da manutenção podem compreender a dinâmica comportamental do sistema de um modo mais realista e, consequentemente, dependendo do nível de confiança, predizer as ações de manutenção necessárias para a melhoria do desempenho do sistema.

Al-Najjar e Alsayouf (2003) e Lu e Sy (2009) desenvolvem modelos que apoiam a tomada de decisão na escolha da mais eficiente técnica de manutenção, utilizando os softwares MATLAB Fuzzy Logic Toolbox e fuzzyTECH, respetivamente.

Utilizando os algoritmos genéticos como técnica de otimização, Tsai *et al.* (2001) e Dahal *et al.* (1999) determinam os instantes das ações de manutenção. Em particular, Dahal *et al.* (1999) comparam os resultados obtidos pelo algoritmo genético usando uma *função de avaliação* difusa dos obtidos com a utilização de uma *função de avaliação* rígida. Os autores concluem que a utilização de um algoritmo genético com

uma função de avaliação difusa constitui uma abordagem prática e eficaz na determinação da solução ótima em problemas de planeamento da manutenção.

Apesar dos recentes estudos, na maior parte da literatura existente sobre modelação das operações de manutenção, a incerteza na aplicação do modelo é, regra geral, omitida. O que é facto é que, desde que exista incerteza na medição de factos reais, essa incerteza pode e deve ser completada com um nível de confiança.

5.3 Propagação da incerteza difusa

Do mesmo modo que funções rígidas são importantes na modelação matemática clássica, as funções difusas são importantes na modelação matemática difusa. A forma usual de obter uma função difusa passa por estender a função rígida à aplicação de conjuntos difusos para conjuntos difusos. No Anexo A, Secção A.3.3, são dadas as ferramentas básicas para o cálculo do *output* difuso de uma função f de variáveis difusas (variáveis de *input*). Interessa agora transmitir a incerteza dos parâmetros, modelada por conjuntos difusos, aos resultados, conhecendo as expressões analíticas (genericamente representadas por $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, que fazem a aplicação do espaço dos *inputs* para o espaço dos *outputs*.

Existem dois métodos básicos fundamentais para a realização desta extensão: o procedimento do princípio da extensão; e o método da aritmética intervalar com cortes- α .

5.3.1 Princípio da extensão

Considerando os fundamentos teóricos do princípio da extensão definidos no Anexo A, Secção A.3.3.1, neste trabalho assumem-se apenas números difusos contínuos como subconjuntos difusos dos números reais, que constituem os *inputs* das funções difusas a estudar. Seja f uma função que aplica X , um intervalo do conjunto dos números reais \mathbb{R} , no conjunto dos números reais. Pelo princípio da extensão, irá estender-se a função f à função difusa \tilde{F} , aplicando \tilde{A} , número difuso contínuo de X , a \tilde{B} , um subconjunto difuso de \mathbb{R} .

Se f é contínua, existe um meio de determinar os cortes- α de $\tilde{B} = \tilde{F}(\tilde{A})$. Seja $B^\alpha = [b_1^\alpha, b_3^\alpha]$. Uma vez que os cortes- α de \tilde{B} são intervalos fechados (f é contínua), então, para $0 \leq \alpha \leq 1$:

$$\begin{aligned} b_1^\alpha &= \min \{f(x) : x \in A^\alpha\} \\ b_3^\alpha &= \max \{f(x) : x \in A^\alpha\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Pode ser usado “min” e “max” nas equações anteriores, porque, pelo Teorema de Weierstrass, uma função contínua num intervalo fechado A^α atinge o seu mínimo e máximo nesse intervalo.

As equações anteriores dão uma forma simples de determinação dos cortes- α de $\tilde{B} = \tilde{F}(\tilde{A})$. Supondo que f é crescente em X , tem-se que $b_1^\alpha = f(a_1^\alpha)$ e $b_3^\alpha = f(a_3^\alpha)$, onde $A^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$ (Buckley e Eslami, 2002).

Generalize-se f à aplicação $X_1 \times \dots \times X_n$, sendo X_1, \dots, X_n intervalos do conjunto real \mathbb{R} . Assume-se que f é uma função contínua e, usando o princípio de extensão, estende-se f a \tilde{F} , em que $\tilde{C} = \tilde{F}(\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n)$, sendo $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$ números difusos contínuos de X_1, \dots, X_n , respetivamente. Se $C^\alpha = [c_1^\alpha, c_3^\alpha]$, então, para $0 \leq \alpha \leq 1$:

$$\begin{aligned} c_1^\alpha &= \min \{f(x_1, \dots, x_n) : x_1 \in A_1^\alpha, \dots, x_n \in A_n^\alpha\} \\ c_3^\alpha &= \max \{f(x_1, \dots, x_n) : x_1 \in A_1^\alpha, \dots, x_n \in A_n^\alpha\} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Seja, por exemplo, f a aplicação $X \times Y$, sendo X e Y intervalos do conjunto real \mathbb{R} . Se f é uma função contínua e $\partial f / \partial x > 0$ e $\partial f / \partial y < 0$, então o princípio da extensão estende f a \tilde{F} , em que $\tilde{C} = \tilde{F}(\tilde{A}, \tilde{B})$, sendo \tilde{A} e \tilde{B} números difusos contínuos de X e Y , verificando-se, para todo α , que:

$$c_1^\alpha = f(a_1^\alpha, b_3^\alpha)$$

e

$$c_3^\alpha = f(a_3^\alpha, b_1^\alpha) \quad (5.3)$$

O método descrito, que simplifica manipulações do princípio de extensão para valores de variáveis difusas contínuas, em particular para números difusos, é conhecido como *método vértice* (Dong e Shah, 1987).

5.3.2 Aritmética intervalar com cortes- α

Em todas as funções que, normalmente, se utilizam em ciências e em engenharia existe um algoritmo, utilizando um número finito de adições, subtrações, multiplicações e divisões, que calcula o valor da função com a precisão desejada. Algumas funções podem ser estendidas a funções difusas, usando cortes- α e aritmética intervalar. Seja $y=f(x)$ uma dessas funções. O cálculo dos cortes- α resulta na seguinte função:

$$[c_1^\alpha, c_3^\alpha] = f([a_1^\alpha, a_3^\alpha])$$

$A^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$ é o intervalo *input* em f e, após efetuar as operações aritméticas necessárias para avaliar f neste intervalo, obtém-se o intervalo $\tilde{C} = [c_1^\alpha, c_3^\alpha]$.

Uma função $z=f(x, y)$ pode também ser estendida a $\tilde{C} = \tilde{F}(\tilde{A}, \tilde{B})$, por aritmética intervalar com cortes- α , desde que \tilde{A} e \tilde{B} sejam números difusos contínuos nos intervalos X_1 e X_2 , respetivamente. Assim, para $0 \leq \alpha \leq 1$:

$$C^\alpha = f(A^\alpha, B^\alpha).$$

5.3.3 Comparação dos métodos de propagação difusa

Nesta secção apresenta-se a comparação entre os métodos de extensão de f a \tilde{F} , expostos nas secções anteriores.

Denote-se por \tilde{F}_e e por \tilde{F}_i a extensão difusa obtida pelo princípio da extensão e pela aritmética intervalar com cortes- α , respetivamente. Buckley e Eslami (2002) garantem que, para um número difuso contínuo $\tilde{A} \in X$, tem-se que:

$$\tilde{F}_e(\tilde{A}) \leq \tilde{F}_i(\tilde{A})$$

e que este resultado se verifica, também, para duas ou mais variáveis não interativas.

Apesar de não ser conhecida uma condição necessária e suficiente para que $\tilde{F}_e = \tilde{F}_i$, sabe-se que se cada número difuso aparece uma só vez na expressão, é esperado que \tilde{F}_e e \tilde{F}_i produzam o mesmo resultado (Buckley e Eslami, 2002).

Assim, sempre que se estuda uma função difusa, é necessário referir qual o método utilizado para a “fuzzificação” da função original, sendo de esperar que o método da aritmética intervalar com cortes- α produza um resultado mais disperso do que o método que aplica o princípio da extensão.

5.4 Análise do custo da política de manutenção

No capítulo anterior, a Eq. (4.35) reflete o custo esperado de manutenção por unidade de tempo de um sistema com dois modos de falha sujeito a uma política de manutenção preventiva periódica imperfeita.

O modelo então apresentado considera um sistema com dois modos de falha dependentes e essas falhas podem ser, ou não, imediatamente detetadas. As falhas que são reveladas no momento da sua ocorrência são submetidas a uma reparação. Para detetar falhas que não foram reveladas e para prevenir falhas iminentes são realizadas inspeções e manutenções preventivas periodicamente, sendo que estas últimas ações se revelam imperfeitas, na medida em que melhoram a condição do sistema sem que, por isso, ele fique como novo. As ações de manutenção preventiva não são instantâneas e o sistema é totalmente substituído findo um determinado número de inspeções e manutenções preventivas.

Assumem-se custos relativos a inspeções e manutenções preventivas, reparações mínimas, substituições, bem como custos associados a não detecções imediatas das falhas e a indisponibilidades do sistema.

O objetivo é a determinação dos instantes ótimos (kT , $k=1, 2, \dots, N-1$) para inspeção e manutenção preventiva e, simultaneamente, o número ótimo (N) de inspeções e manutenções preventivas até à substituição completa do sistema.

A função difusa consiste na extensão da função rígida resultante da aplicação de *inputs* difusos. Como se viu na Secção 5.3, existem dois métodos para a realização desta extensão: o procedimento do princípio da extensão; e o método da aritmética intervalar com cortes- α . Aqui utiliza-se essencialmente o primeiro desses métodos.

Suponha-se, então, que o parâmetro “tempo esperado de indisponibilidade”, τ , é, ao contrário do que foi considerado no capítulo anterior, um número difuso, $\tilde{\tau}$. Pelo princípio da extensão, irá estender-se a função $C(T, N)$ à função difusa $\tilde{C}(T, N)$, aplicando $\tilde{\tau}$, número difuso contínuo de \mathbb{R} , a \tilde{B} , um subconjunto difuso de \mathbb{R} . Assim, $\tilde{\tau}$ constitui um *input* (difuso) da função difusa. Deste modo, a equação definida em (4.35), toma agora a forma:

$$\tilde{C}(T, N) = \frac{c_1 H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} + c_2 H_2(NT) + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tilde{\tau})} \quad (5.4)$$

onde $c_1 = c_{m1} + (1-p)c_{d1}$ e $c_2 = c_{m2} + (1-p)c_{d2}$.

Por uma questão de simplicidade, doravante C representa a função rígida $C(T, N)$ e \tilde{C} representa a função difusa $\tilde{C}(T, N)$.

Sejam $B^\alpha = [b_1^\alpha, b_3^\alpha]$, $0 \leq \alpha \leq 1$, os intervalos fechados (C é contínua) que representam os cortes- α de $\tilde{B} = \tilde{C}(\tilde{\tau})$. Sendo C contínua, e como $\partial C / \partial \tau < 0$, então, pelas equações definidas em (5.2), tem-se que, para $\tau^\alpha = [\tau_1^\alpha, \tau_3^\alpha]$:

$$b_1^\alpha = C(\tau_3^\alpha)$$

e

$$b_3^\alpha = C(\tau_1^\alpha). \quad (5.5)$$

Deste modo, sabe-se que os extremos da função custo (difusa) são obtidos através dos extremos do parâmetro difuso considerado como *input*. Por razões que se prendem, basicamente, com a simplicidade de representação, para modelar a incerteza dos

parâmetros são utilizados números difusos triangulares, sem que daí resulte qualquer perda de generalidade.

É muito importante ter em atenção que, num sistema e modelo de manutenção com este tipo de características, quase todos os parâmetros considerados na Eq. (4.35) são muito difíceis de estimar com precisão. Por exemplo, sabe-se que o tempo de indisponibilidade (devido a ações de manutenção) não é constante. Também o fator de ajustamento assumido se manifesta, na maior parte das situações reais, impossível de obter com certeza. Em algumas aplicações, a probabilidade de uma falha no sistema ser imediatamente detetada após a sua ocorrência, assim como os custos associados à não deteção, são também parâmetros muito difíceis de obter. Por esta razão, estes parâmetros e/ou outros, dependendo da situação concreta real que se pretenda estudar, não deverão ser considerados rígidos. De um modo geral, a atribuição de valores rígidos aos parâmetros do modelo definido pela Eq. (4.35) constitui apenas uma de muitas combinações possíveis de valores que esses parâmetros podem assumir. Desse modo, reduzir cada um desses parâmetros a um único valor numérico num contexto em que é pouca a informação quantitativa, mas onde exista informação de “qualidade” provenientes dos peritos que operam com o sistema, é ignorar a realidade e, por conseguinte, aumentar o risco na tomada de decisão.

Assim, se se considerar os referidos parâmetros como difusos, a Eq. (4.35) vem:

$$\tilde{C}(T, N) = \frac{\tilde{c}_1 H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(\tilde{a}-1)H_2(kT)} + \tilde{c}_2 H_2(NT) + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tilde{\tau})} \quad (5.6)$$

onde $\tilde{c}_1 = c_{m1} + (1 - \tilde{p})\tilde{c}_{d1}$ e $\tilde{c}_2 = c_{m2} + (1 - \tilde{p})\tilde{c}_{d2}$.

Assumam-se, então, sem perda de generalidade, os cinco números difusos triangulares contínuos:

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} &= [\tau_1, \tau_2, \tau_3]; \quad \tilde{p} = [p_1, p_2, p_3]; \quad \tilde{a} = [a_1, a_2, a_3]; \\ \tilde{c}_{d1} &= [c_{d11}, c_{d12}, c_{d13}] \text{ e } \tilde{c}_{d2} = [c_{d21}, c_{d22}, c_{d23}]. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Estes parâmetros, juntamente com os restantes (rígidos), formam o conjunto de parâmetros da Eq. (5.6).

Considerem-se, ainda, os cortes de nível alfa dos números difusos definidos em (5.7):

$$\tau^\alpha = [\tau_1^\alpha, \tau_3^\alpha]; p^\alpha = [p_1^\alpha, p_3^\alpha]; a^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha];$$

$$c_{d1}^\alpha = [c_{d11}^\alpha, c_{d13}^\alpha] \text{ e } c_{d2}^\alpha = [c_{d21}^\alpha, c_{d23}^\alpha];$$

Sabe-se que C é uma função contínua e, usando o princípio de extensão, estende-se C a \tilde{C} , em que $\tilde{D} = \tilde{C}(\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}, \tilde{c}_{d2})$, sendo $\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}$ e \tilde{c}_{d2} números difusos contínuos triangulares de \mathbb{R}^+ . Se $D^\alpha = [d_1^\alpha, d_3^\alpha]$, então, pela Eq. (5.2), para $0 \leq \alpha \leq 1$, vem que:

$$d_1^\alpha = \min \left\{ C(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) : x_1 \in \tau^\alpha, x_2 \in p^\alpha, x_3 \in a^\alpha, x_4 \in c_{d1}^\alpha, x_5 \in c_{d2}^\alpha \right\}$$

$$d_3^\alpha = \max \left\{ C(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) : x_1 \in \tau^\alpha, x_2 \in p^\alpha, x_3 \in a^\alpha, x_4 \in c_{d1}^\alpha, x_5 \in c_{d2}^\alpha \right\}$$

Considerando os números difusos $\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}$ e \tilde{c}_{d2} , e sendo C uma função contínua, verifica-se ainda que:

$$\partial C / \partial \tau < 0, \quad \partial C / \partial p < 0, \quad \partial C / \partial a > 0, \quad \partial C / \partial c_{d1} > 0 \quad \text{e} \quad \partial C / \partial c_{d2} > 0.$$

Deste modo, e atendendo às equações definidas em (5.3), o princípio da extensão estende C a \tilde{C} , em que $\tilde{D} = \tilde{C}(\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}, \tilde{c}_{d2})$, sendo $\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}$ e \tilde{c}_{d2} números difusos contínuos de \mathbb{R}^+ , verificando-se, para todo α , que:

$$d_1^\alpha = C(\tau_3^\alpha, p_3^\alpha, a_1^\alpha, c_{d11}^\alpha, c_{d21}^\alpha)$$

e

$$d_3^\alpha = C(\tau_1^\alpha, p_1^\alpha, a_3^\alpha, c_{d13}^\alpha, c_{d23}^\alpha) \quad (5.8)$$

A Tabela 5.1 generaliza a aplicação do princípio de extensão ao modelo de custos definido pela Eq. (4.35), para o caso de se assumirem como difusos outros parâmetros que não os considerados.

Tabela 5.1 Output difuso C , pelo princípio da extensão, considerando os parâmetros referentes aos custos, a τ , a p , e a a difusos

Inputs		Output C $\tilde{D} = \tilde{C}(\tilde{\tau}, \tilde{p}, \tilde{a}, \tilde{c}_{d1}, \tilde{c}_{d2}, \tilde{c}_u, \tilde{c}_r, \tilde{c}_p, \tilde{c}_{m1}, \tilde{c}_{m2})$
c_p	$\partial C/\partial c_p > 0$	$d_1^\alpha = C(\tilde{\tau}_3, \tilde{p}_3, \tilde{a}_1, \tilde{c}_{d11}, \tilde{c}_{d21}, \tilde{c}_{u1}, \tilde{c}_{r1}, \tilde{c}_{p1}, \tilde{c}_{m11}, \tilde{c}_{m21})$ $d_3^\alpha = C(\tilde{\tau}_1, \tilde{p}_1, \tilde{a}_3, \tilde{c}_{d13}, \tilde{c}_{d23}, \tilde{c}_{u3}, \tilde{c}_{r3}, \tilde{c}_{p3}, \tilde{c}_{m13}, \tilde{c}_{m23})$
c_r	$\partial C/\partial c_r > 0$	
c_{m1}	$\partial C/\partial c_{m1} > 0$	
c_{m2}	$\partial C/\partial c_{m2} > 0$	
c_u	$\partial C/\partial c_u > 0$	
c_{d1}	$\partial C/\partial c_{d1} > 0$	
c_{d2}	$\partial C/\partial c_{d2} > 0$	
τ	$\partial C/\partial \tau < 0$	
p	$\partial C/\partial p < 0$	
a	$\partial C/\partial a > 0$	

5.5 Tomada de decisão difusa

5.5.1 Introdução

Tomar decisões é, sem dúvida, uma das atividades fundamentais do ser humano e representa, também, uma das mais importantes tarefas, tanto no meio científico, como político, social e económico. Ser capaz de fazer escolhas corretas e consistentes é a essência de qualquer processo de decisão imbuído de incerteza.

A aplicação dos conjuntos difusos no campo da tomada de decisão tem consistido em extensões ou “fuzzificações” das teorias clássicas da tomada de decisão. Uma tomada de decisão clássica lida, geralmente, com um conjunto de resultados alternativos, um conjunto de ações alternativas disponíveis ao decisor, o resultado esperado de cada uma das ações alternativas e, por fim, uma função objetivo que produz uma ordenação dos resultados.

Diz-se que uma decisão é tomada sob condições de *certeza* quando o resultado de cada ação pode ser precisamente determinado e ordenado. Uma decisão é tomada sob condições de *risco* quando se conhecem as probabilidades dos resultados das diferentes ações alternativas. Por sua vez, uma decisão é tomada sob condições de *incerteza* quando as probabilidades dos resultados são desconhecidas ou pouco relevantes, pois os

resultados de cada ação são caracterizados apenas de modo aproximado (Klir e Yuan, 1995). O problema de tomar condições sob incerteza incide, essencialmente, no facto de que a informação acerca dos possíveis resultados e das possíveis consequências de cada ação ser tipicamente vaga, ambígua e imprecisa.

Klir e Yuan (1995) e Zimmermann (1997) classificam os problemas de tomada de decisão segundo vários critérios. De acordo com um dos critérios, distinguem-se os problemas que envolvem uma tomada de decisão individual daqueles que envolvem a participação de mais pessoas na tomada decisão. Outro critério de classificação diferencia problemas de decisão envolvendo otimização simples sob constrangimentos de problemas de decisão que incluem otimização sob múltiplos critérios (otimização multicritério). Os autores identificam, ainda, um outro modo para a classificação da tomada de decisão, que se prende com o número de passos da tomada de decisão. A decisão pode, então, ser tomada de uma só vez ou, iterativamente, em diferentes estados.

Em problemas de decisão multicritério, cada critério induz uma ordenação particular das alternativas, sendo necessário um procedimento que garanta uma ordenação única total. Estudos sobre tomada de decisão multicritério, modelando a incerteza com conjuntos difusos, podem ser encontrados em Goumas e Lygerou (2000), Ekel *et al.* (1998) e Slany (1996).

Os problemas de tomada de decisão com múltiplos estados podem ser considerados uma espécie de processos dinâmicos, já que o objetivo não é determinado com a resolução de um problema de decisão simples, mas através da resolução de uma sequência de problemas de decisão. Estes problemas, que representam estados de resolução, apresentam dependência entre si. Li *et al.* (2008) aplica este conceito de tomada de decisão difusa à gestão de recursos hidráulicos.

Geralmente, os problemas de tomada de decisão difusa prendem-se com problemas de otimização difusa, nos quais se pretende maximizar, ou minimizar, um conjunto difuso (que, normalmente, corresponde a um valor da função difusa) sujeito a uma ou mais restrições difusas.

5.5.2 Ordenação difusa

A ordenação usual dos números reais confere uma ordenação completa dos números, facilitando a determinação do máximo, ou mínimo, de um conjunto finito de números reais e do supremo (ou ínfimo) de um conjunto infinito de números reais, desde que limitado superiormente (ou inferiormente). Contudo, a maioria das ordenações de números difusos não é total e o colapso de resultados difusos, apesar de fornecer uma ordenação total, normalmente acarreta problemas (Buckley e Eslami, 2002), uma vez que o colapso, independentemente do método utilizado, utiliza apenas um valor do número difuso, pelo que toda a restante informação acaba por ser perdida. Detalhes sobre ordenação difusa podem ser encontrados em Klir e Yuan (1995), Ross (1995) e Buckley e Eslami (2002).

Contudo, em processos de tomada de decisão torna-se, frequentemente, necessário converter um resultado difuso num valor rígido. Esse valor será, sob um determinado ponto de vista, o mais representativo do resultado difuso. Naturalmente, a informação dada pela função de pertença é mais rica do que a resultante do colapso dessa função, pelo que esta operação apenas é levada a cabo quando estritamente necessário. Existem vários métodos disponíveis para efetuar o colapso de funções de pertença, alguns dos quais são apresentados na Secção A.3.4, do Anexo A. No entanto, Saade (1996) refere que o colapso de resultados difusos deve ser realizado sob o ponto de vista da sua ordenação, ao invés de tomar a sua representação rígida como uma quantidade isolada. Nesse sentido, procede à generalização do critério de Hurwicz para conjuntos difusos, resultando na aplicação de uma função de colapso não probabilística, G , que mapeia um conjunto difuso \tilde{A} , em que $A^\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha]$ é o intervalo de corte de nível α de \tilde{A} , num número rígido, do seguinte modo:

$$G(\tilde{A}) = \int_0^1 [\delta a_1^\alpha + (1 - \delta) a_2^\alpha] d\alpha \quad (5.9)$$

onde $\delta \in [0, 1]$ representa o grau de pessimismo/otimismo do decisor. Valores de δ próximos de 0 e de 1 indicam, respetivamente, um pensamento otimista e um pensamento pessimista por parte do decisor. O valor de $\delta=0.5$ identifica a posição neutra do decisor. Neste caso, o Método de Saade corresponde ao critério da distância

total (TDC-*total distance criterion*) (Miranda, 1998), o qual, para um número difuso triangular $\tilde{B} = [b_1, b_2, b_3]$, toma a forma:

$$G(\tilde{B}) = \frac{1}{2}(b_1 + 2b_2 + b_3) \quad (5.10)$$

Enea *et al.* (2005) estendem o conceito descrito pela condição (5.9), considerando um grau de risco aceitável (h). Assim:

$$G(\tilde{A}) = \frac{1}{h} \int_h^1 [\delta a_1^\alpha + (1 - \delta) a_2^\alpha] d\alpha \quad (5.11)$$

Herrera *et al.* (1994) referem que um número difuso triangular, $\tilde{B} = [b_1, b_2, b_3]$, pode ser convertido num número rígido da seguinte forma:

$$G(\tilde{B}) = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{r + 1} + \delta \frac{b_3 - b_1}{r + 1} \quad (5.12)$$

onde r é um parâmetro de acordo com o qual G pode tomar valores próximos do valor modal ($r > 1$) ou próximos dos valores do suporte ($r < 1$).

5.5.3 Objetivos, constrangimentos e decisões difusas

Em 1970, Bellman e Zadeh (1970) sugerem o primeiro modelo difuso de tomada de decisão, no qual os objetivos e os constrangimentos são apresentados como conjuntos difusos e, através de uma agregação apropriada destes conjuntos, é determinada uma decisão. Este trabalho serviu como ponto de partida para diversos investigadores da *Teoria da Decisão Difusa*. Estes autores identificam como principais componentes no processo de decisão:

- Um conjunto A de possíveis ações;
- Um conjunto de objetivos \tilde{O}_i ($i \in N_n$), cada um dos quais expresso em termos de um conjunto difuso definido em A ;

- Um conjunto de constrangimentos \tilde{C}_j ($j \in N_m$), cada um dos quais, também, expresso em termos de conjuntos difusos definidos em A .

É frequente, no entanto, que os conjuntos difusos que representam os objetivos e os constrangimentos não estejam diretamente definidos no conjunto possível de ações A . Em muitas situações, aparecem definidos indiretamente, através de outros conjuntos que caracterizam importantes e relevantes estados. Este é um caso mais geral e que tem um particular interesse em aplicações reais. No planeamento da manutenção, a minimização do custo de manutenção é um exemplo de um objetivo a alcançar e a garantia de um valor mínimo de disponibilidade do sistema pode representar, por exemplo, um constrangimento.

Suponha-se que os objetivos e os constrangimentos são representados como conjuntos difusos \tilde{O}_i e \tilde{C}_j , respetivamente, definidos nos conjuntos Y e A , respetivamente, com $i \in N_n$ e $j \in N_m$. Assuma-se que estes conjuntos difusos, representando objetivos e constrangimentos, são expressos pelo decisor. Seja f uma aplicação de A para Y , em que a representa o *input* (causa) e y ($y=f(a)$) representa o *output* (efeito). Assim, dado um conjunto difuso \tilde{O}_i em Y , facilmente se determina um conjunto difuso \tilde{O}_i em A que induz \tilde{O}_i em Y . Especificamente, a função de pertença de \tilde{O}_i é dada, para cada $i \in N_n$, pela igualdade:

$$\mu_{\tilde{O}_i}(a) = \mu_{\tilde{O}_i}(f(a))$$

onde $f:A \rightarrow Y$. Deste modo, o caso onde os objetivos e os constrangimentos são definidos como conjuntos difusos em diferentes espaços pode ser reduzido ao caso onde eles são definidos no mesmo espaço.

Generalizando o conceito acima, se os conjuntos difusos que representam objetivos e constrangimentos não estão ambos definidos diretamente no conjunto de ações A , mas, pelo contrário, estão definidos em Y_i e X_j , respetivamente, então os significados das ações no conjunto A podem ser descritos em termos de Y_i e X_j , respetivamente, pelas seguintes funções:

$$o_i : A \rightarrow Y_i$$

e

$$c_j : A \rightarrow X_j$$

para cada $i \in N_n$ e $j \in N_m$.

As funções de pertença dos objetivos \tilde{O}_i ($i \in N_n$) e os constrangimentos \tilde{C}_j ($j \in N_m$) são expressas pelas composições de o_i com \tilde{O}_i ' e de c_j com \tilde{C}_j ' , respectivamente. Ou seja, para cada $a \in A$,

$$\mu_{O_i}(a) = \mu_{O_i'}(o_i(a))$$

e

$$\mu_{C_j}(a) = \mu_{C_j'}(c_j(a))$$

Desta forma, num processo de decisão caracterizado pelos conjuntos difusos A , \tilde{O}_i ($i \in N_n$) e \tilde{C}_j ($j \in N_m$), o conjunto difuso \tilde{D} em A , que simultaneamente satisfaz os objetivos \tilde{O}_i e os constrangimentos \tilde{C}_j dados, é chamado de *decisão difusa*. Para todo $a \in A$ e utilizando a interseção difusa padrão, o conjunto \tilde{D} é determinado por:

$$\mu_D(a) = \min \left[\inf_{i \in N_n} \mu_{O_i}(a), \inf_{j \in N_m} \mu_{C_j}(a) \right] \quad (5.13)$$

Intuitivamente, uma decisão difusa é basicamente uma escolha ou um conjunto de escolhas do conjunto de alternativas disponíveis e pode ser interpretada como um conjunto difuso de alternativas resultante da interseção de objetivos e constrangimentos.

Uma vez determinada a decisão difusa, pode interessar, na perspectiva de tomada de decisão, a determinação da “melhor” solução rígida do conjunto difuso definido em (5.13). Esta determinação pode ser feita facilmente, por exemplo, pelo *método dos máximos das funções de pertença* (Secção A.3.4, Anexo A), pela escolha da alternativa $a^* \in A$ que atinge função de pertença máxima em \tilde{D} (Figura 5.2). No entanto, este procedimento ignora a informação referente às restantes alternativas e, por isso, pode não ser apropriado em muitas situações. Assim, sempre que A esteja definido em \mathbb{R} , é

preferível determinar a^* por um método de “desfuzzificação” apropriado. Diferentes formas de colapsar resultados difusos são apresentadas na Secção A.3.4 (Anexo A) e, tendo em vista a sua ordenação, na Secção 5.5.2.

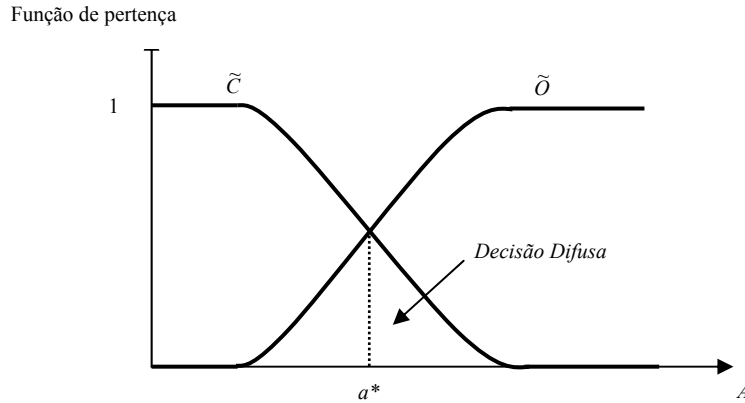


Figura 5.2 Exemplo de uma decisão difusa

Note-se que definindo a decisão difusa \tilde{D} , expressa na Eq. (5.13), como uma interseção – ou mais genericamente como uma *confluência* – de objetivos e constrangimentos, assume-se que ambos têm igual importância. Porém, há muitas situações nas quais \tilde{D} deve estar expresso como uma combinação convexa de objetivos e constrangimentos, com diferentes coeficientes de ponderação, refletindo a importância relativa dos diferentes termos (Bellman e Zadeh, 1970).

Neste sentido, o modelo antes descrito pode ser estendido de forma a incluir importâncias relativas dos vários objetivos e constrangimentos envolvidos, através do uso de coeficientes ponderadores. Assim, a decisão difusa \tilde{D} pode ser escrita, para todo $a \in A$ como uma combinação convexa de n objetivos e m constrangimentos ponderados:

$$\mu_D(a) = \sum_{i=1}^n u_i \mu_{O_i}(a) + \sum_{j=1}^m v_j \mu_{C_j}(a) \quad (5.14)$$

onde u_i e v_j são ponderações não negativas afetas a cada objetivo difuso \tilde{O}_i ($i \in N_n$) e a cada constrangimento difuso \tilde{C}_j ($j \in N_m$), respetivamente, tal que

$$\sum_{i=1}^n u_i + \sum_{j=1}^m v_j = 1 \quad (5.15)$$

Assim, os valores u_i e v_j devem ser escolhidos de modo a que reflitam a importância relativa de $\tilde{O}_1, \tilde{O}_2, \dots, \tilde{O}_n$ e $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_m$. Obviamente, os valores u_i e v_j refletem a opinião, experiência e crença do decisor. Suponha-se que, por exemplo, o decisor está mais interessado em minimizar o custo do que em garantir uma disponibilidade acima de um determinado valor. Então, u_i e v_j poderiam ser, por exemplo, 0.6 e 0.4, respetivamente.

Desta forma, a generalização direta da Eq. (5.13) pode ser expressa como:

$$\mu_D(a) = \min \left[\inf_{i \in N_n} \mu_{O_i^{u_i}}(a), \inf_{j \in N_m} \mu_{C_j^{v_j}}(a) \right]. \quad (5.16)$$

onde $O_i^{u_i}$ representa o objetivo O_i com ponderação u_i ($i \in N_n$) e $C_j^{v_j}$ representa o constrangimento C_j com ponderação v_j ($j \in N_m$), em que é satisfeita a Eq. (5.15).

Fazendo isto, é possível avaliar quão bem cada alternativa, ou escolha, satisfaz cada objetivo e cada constrangimento, bem como combinar, de um modo plausível, os objetivos e constrangimentos ponderados numa decisão difusa global.

5.6 Aplicação numérica

Nesta secção são dados alguns exemplos numéricos que ilustram a aplicabilidade da extensão difusa do modelo desenvolvido no Capítulo 4.

Considere-se, então, a função que expressa o custo esperado de manutenção por unidade de tempo definida no Capítulo 4, pela condição (4.35).

Suponha-se que existem motivos para que se considere o parâmetro “tempo esperado de indisponibilidade”, τ , um número difuso, $\tilde{\tau}$. Pelo princípio da extensão, irá estender-se a função C à função difusa \tilde{C} , constituindo $\tilde{\tau}$ um *input* (difuso) da função difusa, obtendo-se, deste modo, a função difusa expressa na Eq. (5.4).

A Tabela 5.2, assumindo a função custo definida na Eq. (5.4), reconhece os pressupostos antes descritos e compara a política de manutenção ótima para o caso em que: i) todos os valores dos parâmetros *input* são rígidos e ii) os valores dos parâmetros *input* são rígidos e difusos. Todos os cálculos foram efetuados recorrendo ao software

Mathematica, utilizando o método de otimização *Differential Evolution*⁴. Por uma questão de simplicidade, o custo ótimo de manutenção para todos os parâmetros de *input* rígidos e para parâmetros de *input* rígidos e difusos, $C(T^*, N^*)$ e $\tilde{C}(T^*, N^*)$, respectivamente, será doravante apenas designado por C^* . Pela mesma razão, também o *input* rígido τ e o *input* difuso $\tilde{\tau}$ serão apenas designados por τ .

Tabela 5.2 Política ótima e custo ótimo de manutenção, para: i) valores dos parâmetros *input* rígidos e ii) valores dos parâmetros *input* rígidos, exceto τ que se considera difuso

		i) Rígidos	ii) Rígidos/ difusos
<i>Inputs</i>	$H_1(t)$	$3t^{2.2}$	$3t^{2.2}$
	$H_2(t)$	$2t^2$	$2t^2$
	c_p	30	30
	c_r	800	800
	c_{m1}	10	10
	c_{m2}	15	15
	c_u	10	10
	c_{d1}	15	15
	c_{d2}	20	20
	τ	0.01	[0.005, 0.01, 0.015]
	p	0.4	0.4
	a	1.05	1.05
	<i>Outputs</i>	N^*	3
T^*		1.14207	1.14207
T^*N^*		3.42621	3.42621
C^*		488.175	[486.065, 488.175, 490.303]

⁴ No tutorial do *Mathematica* o método *Differential Evolution* é definido como uma função estocástica simples de minimização. O algoritmo gera uma população de m pontos, $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, onde tipicamente $m \gg n$, com n o número de variáveis. Durante cada iteração do algoritmo, uma nova população de m pontos é gerada. O processo converge quando a diferença entre os melhores valores da função na população nova e os melhores valores da função na população velha é menor do que um determinado valor.

Este método é computacionalmente dispendioso, mas é relativamente robusto e tende a funcionar bem para problemas com mínimos locais.

Observando a Tabela 5.2, constata-se que o *output* rígido obtido para o custo ótimo de manutenção, C^* , quando considerados todos os parâmetros rígidos, é um caso particular do *output* obtido para C^* quando considerado τ difuso.

A Figura 5.3 mostra o resultado obtido de C^* , para todos os valores dos parâmetros rígidos, assumidos na Tabela 5.2, à exceção de τ que é considerado difuso.

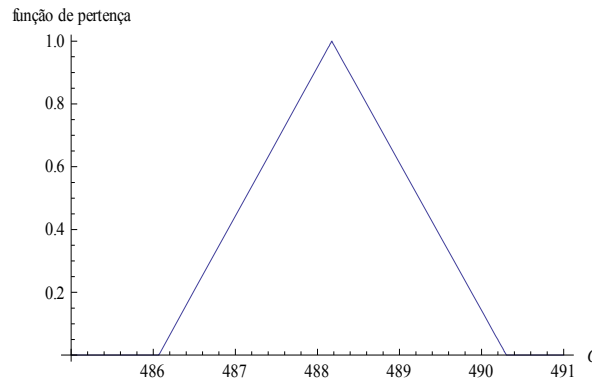


Figura 5.3 *Output* difuso C^* , resultantes da aplicação da função custo, admitindo o parâmetro de *input* τ difuso

Pela Eq. (2.21), a disponibilidade neste caso vem dada por:

$$A_{inh} = \frac{T^*}{T^* + \tau} \quad (5.17)$$

Já foi referido na Secção 5.3.3 que, com o intuito de reduzir a dispersão desnecessária nos resultados, cada número difuso só deverá figurar uma vez na expressão. Neste caso concreto, T^* não assume um valor difuso. Se fosse esse o caso, a expressão (5.17) poderia tomar a seguinte forma:

$$A_{inh} = \frac{1}{1 + \tau \cdot \frac{1}{T^*}} \quad (5.18)$$

Assumindo $\tau=[0.005, 0.01, 0.015]$, a disponibilidade alcançada é de:

$$A_{inh}=[0.987, 0.991, 0.996].$$

A Figura 5.4 faz a representação gráfica da disponibilidade, A_{inh} , proveniente de $T^*=1.14207$ e $\tau=[0.005, 0.01, 0.015]$.

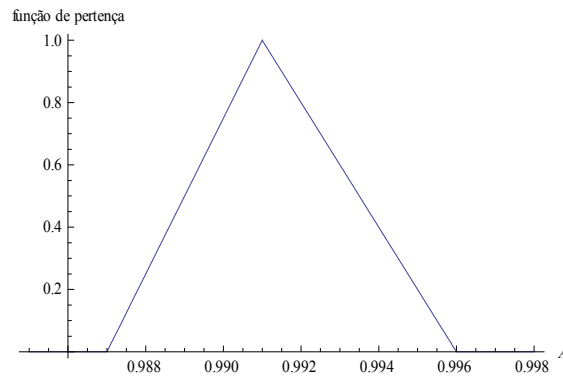


Figura 5.4 Disponibilidade difusa, admitindo o parâmetro de *input* τ difuso

Um constrangimento do problema pode ser, por exemplo, garantir uma disponibilidade *aproximadamente superior a 99.2%*. Este termo vago pode ser representado pelo conjunto difuso da Figura 5.5.

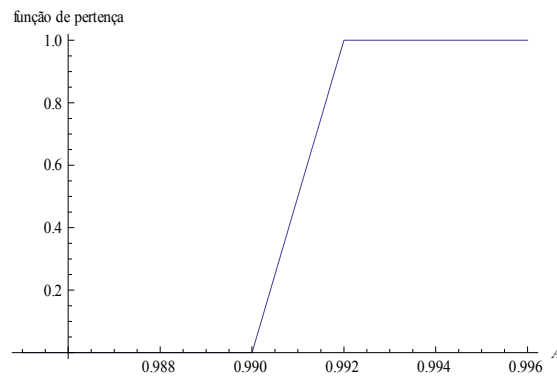


Figura 5.5 Exemplo de conjunto difuso representativo de um valor mínimo de disponibilidade requerido

A decisão difusa deverá ser o conjunto difuso que simultaneamente satisfaz a disponibilidade possível (Figura 5.4) e a disponibilidade pretendida (Figura 5.5). Esse conjunto difuso está patente na Figura 5.6.

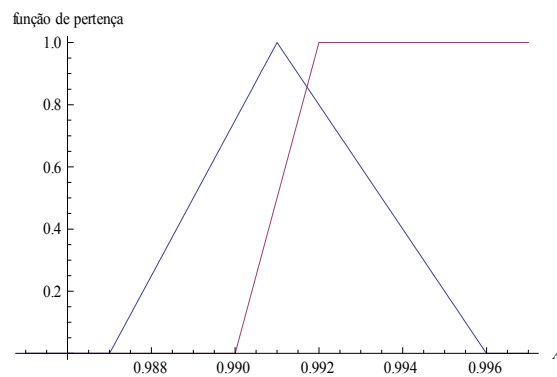


Figura 5.6 Exemplo de uma decisão difusa relativamente à disponibilidade

Verifica-se que o intervalo entre inspeções e manutenções preventivas obtido ($T^*=1.14207$ u.t.) garante a disponibilidade pretendida de *aproximadamente superior a* 99.2%, desde que a duração da ação de manutenção, τ , seja inferior do que 0.01 u.t..

Considere-se, agora, que para além da duração da manutenção preventiva, também a probabilidade de deteção da falha, os custos dessa não deteção e o fator de ajustamento que relaciona os modos de falha de tipo I e tipo II são difusos.

A Tabela 5.3, assumindo a função custo definida na Eq. (5.6), compara a política de manutenção ótima para o caso em que: i) todos os valores dos parâmetros *input* são rígidos e ii) os valores dos parâmetros *input* são rígidos e difusos. Todos os cálculos foram efetuados recorrendo ao software *Mathematica*, utilizando o método de otimização *Differential Evolution*.

Por uma questão de simplicidade na apresentação das tabelas 5.3, 5.6, 5.7 e 5.8, todos os *inputs* difusos considerados, \tilde{c}_{d1} , \tilde{c}_{d2} , $\tilde{\tau}$, \tilde{p} e \tilde{a} , serão apenas referidos como c_{d1} , c_{d2} , τ , p e a , respetivamente.

Tabela 5.3 Política ótima e custo ótimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros *input* rígidos e ii) valores dos parâmetros *input* rígidos e difusos

		i) Rígidos	ii) Rígidos/ difusos
<i>Inputs</i>	$H_1(t)$	$3t^{2.2}$	$3t^{2.2}$
	$H_2(t)$	$2t^2$	$2t^2$
	c_p	30	30
	c_r	800	800
	c_{m1}	10	10
	c_{m2}	15	15
	c_u	10	10
	c_{d1}	15	[5, 15, 25]
	c_{d2}	20	[10, 20, 30]
	τ	0.01	[0.005, 0.01, 0.015]
	p	0.4	[0.2, 0.4, 0.5]
	a	1.05	[1.01, 1.05, 1.1]
<i>Outputs</i>	N^*	3	3
	T^*	1.14207	[0.919176, 1.14207, 1.37477]
	T^*N^*	3.42621	[2.75753, 3.42621, 4.12431]
	C^*	488.175	[413.587, 488.175, 593.835]

Pela Tabela 5.3, verifica-se que os *inputs* rígidos atribuídos aos parâmetros do modelo da Eq. (4.35) são apenas uma de muitas combinações possíveis dos valores que os parâmetros podem assumir e que são, na Eq. (5.6), considerados como *input* difusos. Os *outputs* rígidos obtidos, quando considerados todos os parâmetros de *input* rígidos, são também um caso particular dos *outputs* difusos obtidos, quando se assumem alguns parâmetros de *input* difusos.

A Figura 5.7 mostra os resultados obtidos de T^* e C^* , com cortes- α de 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1, para todos os valores dos parâmetros rígidos e difusos assumidos na Tabela 5.3.

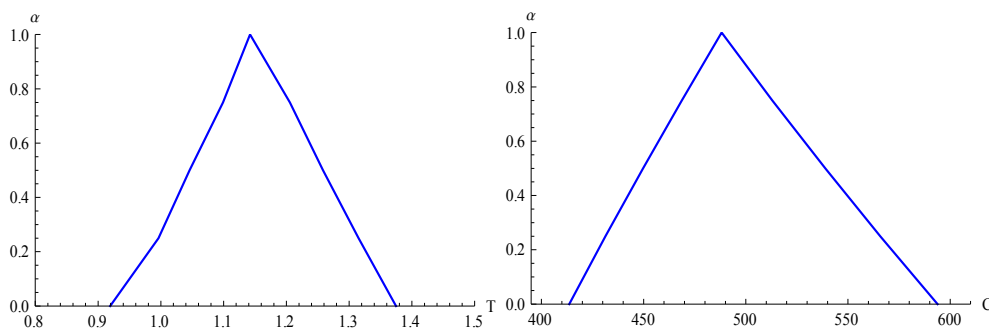


Figura 5.7 *Outputs* difusos, T e C , resultantes da aplicação da função custo, admitindo os parâmetros de *input* rígidos e difusos

Se houver necessidade de converter o resultado de T^* difuso num resultado rígido, pode, por exemplo, utilizar-se o método do centro de gravidade (Secção A.3.4, Anexo A), com cortes- α 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1, obtendo como valor rígido ótimo entre inspeções e manutenções preventivas $T^* = 1.0074$ u.t..

Se, no entanto, o colapso for realizado tendo em conta a experiência, opinião e convicção do decisor, pode aplicar-se o método defendido por Saade (1996), expresso pela Eq. (5.9), no qual $\delta \in [0, 1]$ representa o grau de pessimismo/otimismo do decisor. Assim, a Tabela 5.4 identifica algumas situações.

Tabela 5.4 Colapso do *output* T^* da Tabela 6.3, pela Eq. (5.9), para diferentes valores de δ

δ	0	0.1	0.5	0.9	1
T^*	1.37477	1.32921	1.14697	0.964735	0.919176

Pela Eq. (5.18), assumindo $T^* = [0.919176, 1.14207, 1.37477]$ e $\tau = [0.005, 0.01, 0.015]$, a disponibilidade é de:

$$A_{inh} = [0.984, 0.991, 0.996].$$

A Tabela 5.5 testa alguns valores da disponibilidade expressa pela Eq. (5.18) para os casos em que o valor ótimo difuso de T é o constante na Tabela 5.4.

Tabela 5.5 Disponibilidade difusa, considerando os valores do colapso do *output* T^* , obtidos na Tabela 5.4, para diferentes valores de δ

δ	T^*	τ	A
0	1.37477	[0.005, 0.01, 0.015]	[0.989, 0.992, 0.996]
0.1	1.32921	[0.005, 0.01, 0.015]	[0.989, 0.993, 0.996]
0.5	1.14697	[0.005, 0.01, 0.015]	[0.987, 0.991, 0.996]
0.9	0.964735	[0.005, 0.01, 0.015]	[0.985, 0.99, 0.995]
1	0.919176	[0.005, 0.01, 0.015]	[0.984, 0.989, 0.995]

Verifica-se, como seria de esperar, que a disponibilidade é tanto maior quanto menor for a duração da ação de manutenção preventiva τ .

5.6.1 Efeitos da diminuição da incerteza em alguns dos parâmetros difusos do modelo de custos de manutenção

O que se pretende nesta pequena secção é verificar se o esforço da obtenção de mais informação acerca de um dos parâmetros difusos altera (reduz) consideravelmente a incerteza na função custo.

Assim, considere-se, por exemplo, uma redução de 50% da incerteza relativamente ao valor modal dos parâmetros difusos p , a e τ apresentados na Tabela 5.3. Estes parâmetros tomariam, respetivamente, os valores:

$$p=[0.3, 0.4, 0.45]$$

$$a=[1.03, 1.05, 1.075]$$

$$\tau=[0.0075, 0.01, 0.0175].$$

A Tabela 5.6 apresenta os valores dos parâmetros de *input* na função custo da Eq. (5.6), considerando uma redução de 50% na incerteza de p , e os correspondentes valores de *output*.

Tabela 5.6 Política ótima e custo ótimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros *input* rígidos e ii) valores dos parâmetros *input* rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de p

		i) Rígidos	ii) Rígidos/ difusos
<i>Inputs</i>	$H_1(t)$	$3t^{2.2}$	$3t^{2.2}$
	$H_2(t)$	$2t^2$	$2t^2$
	c_p	30	30
	c_r	800	800
	c_{m1}	10	10
	c_{m2}	15	15
	c_u	10	10
	c_{d1}	15	[5, 15, 25]
	c_{d2}	20	[10, 20, 30]
	τ	0.01	[0.005, 0.01, 0.015]
	p	0.4	[0.3, 0.4, 0.45]
	a	1.05	[1.01, 1.05, 1.1]
	<i>Outputs</i>	N^*	3
T^*		1.14207	[1.05444, 1.14207, 1.35916]
T^*N^*		3.42621	[3.16332, 3.42621, 4.07748]
C^*		488.175	[418.377, 488.175, 528.228]

A Tabela 5.7 apresenta os valores dos parâmetros de *input* na função custo da Eq. (5.6), considerando uma redução de 50% na incerteza de a , e os correspondentes valores de *output*.

Tabela 5.7 Política ótima e custo mínimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros *input* rígidos e ii) valores dos parâmetros *input* rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de a

		i) Rígidos	ii) Rígidos/ difusos
<i>Inputs</i>	$H_1(t)$	$3t^{2.2}$	$3t^{2.2}$
	$H_2(t)$	$2t^2$	$2t^2$
	c_p	30	30
	c_r	800	800
	c_{m1}	10	10
	c_{m2}	15	15
	c_u	10	10
	c_{d1}	15	[5, 15, 25]
	c_{d2}	20	[10, 20, 30]
	τ	0.01	[0.005, 0.01, 0.015]
	p	0.4	[0.2, 0.4, 0.5]
	a	1.05	[1.03, 1.05, 1.075]
	<i>Outputs</i>	N^*	3
T^*		1.14207	[1.03205, 1.14207, 1.35984]
T^*N^*		3.42621	[3.09615, 3.42621, 4.07952]
C^*		488.175	[415.038, 488.175, 544.49]

A Tabela 5.8 apresenta, agora, os valores dos parâmetros de *input* na função custo da Eq. (5.6), considerando uma redução de 50% na incerteza de τ , e os correspondentes valores de *output*.

Tabela 5.8 Política ótima e custo mínimo de manutenção para: i) valores dos parâmetros *input* rígidos e ii) valores dos parâmetros *input* rígidos e difusos, assumindo uma redução na incerteza de τ

		i) Rígidos	ii) Rígidos/ difusos
<i>Inputs</i>	$H_1(t)$	$3t^{2.2}$	$3t^{2.2}$
	$H_2(t)$	$2t^2$	$2t^2$
	c_p	30	30
	c_r	800	800
	c_{m1}	10	10
	c_{m2}	15	15
	c_u	10	10
	c_{d1}	15	[5, 15, 25]
	c_{d2}	20	[10, 20, 30]
	τ	0.01	[0.0075, 0.01, 0.0175],
	p	0.4	[0.2, 0.4, 0.5]
	a	1.05	[1.01, 1.05, 1.01]
<i>Outputs</i>	N^*	3	3
	T^*	1.14207	[1.01864, 1.14207, 1.37245]
	T^*N^*	3.42621	[3.05592, 3.42621, 4.11735]
	C^*	488.175	[412.844, 488.175, 545.11]

A Figura 5.8 compara, graficamente, o custo de manutenção por unidade de tempo obtido para os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 5.3 com aqueles que advêm de uma redução de 50% da incerteza dos parâmetros p , a e τ , constantes nas tabelas 5.6, 5.7 e 5.8, respectivamente.

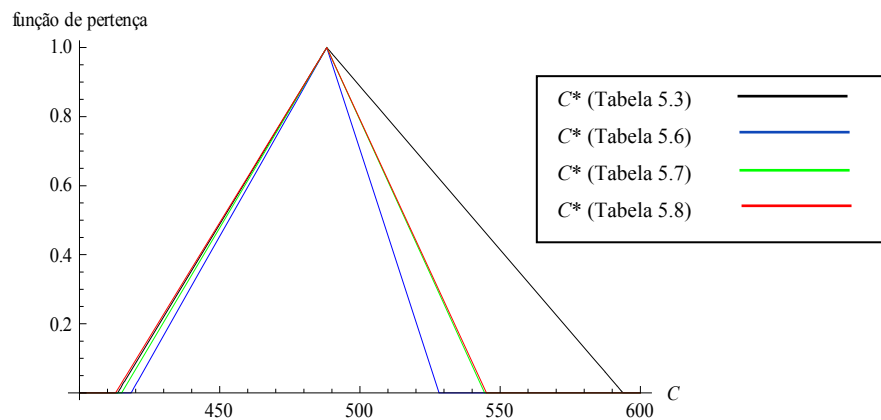


Figura 5.8 *Output* difuso C e *output* difuso C , admitindo uma redução na incerteza de p , de a e de τ

Pela observação da Figura 5.8, constata-se que, diminuindo a incerteza dos parâmetros, a incerteza no custo de manutenção, obviamente, também diminui. No entanto, o custo manifesta-se mais sensível a uma redução na incerteza de p do que a uma redução na incerteza dos parâmetros a e τ . Neste sentido, e analisando somente estes parâmetros, se se pretender reduzir a incerteza do custo, deverá começar-se pela obtenção de um conhecimento mais profundo de p , com vista a reduzir a sua incerteza, já que dos parâmetros analisados, este é, sem dúvida, aquele que se reflete mais na incerteza de C^* .

5.7 Síntese

Apesar de o modelo proposto no capítulo anterior não incluir pressupostos simplificativos que ponham em causa a aplicabilidade do modelo a contextos reais, tais como a independência das falhas ou manutenções preventivas instantâneas, pressupõe o conhecimento pleno de todos os parâmetros envolvidos, isto é, os parâmetros são tomados como valores rígidos ou determinísticos.

O presente capítulo estende o capítulo anterior para um cenário no qual existe incerteza dos parâmetros. Esta incerteza é modelada utilizando conjuntos difusos, o que introduz, por um lado, um fator adicional de complexidade de cálculo, mas, por outro, um acréscimo de realismo ao modelo.

São analisados diferentes modos de propagação da incerteza difusa e ponderados alguns aspetos relacionados com a tomada de decisão difusa, que assume um papel absolutamente essencial na perspetiva da gestão da manutenção.

No capítulo seguinte, o modelo proposto na Secção 5.4 deste capítulo é aplicado a um sistema de controlo ativo de potência de um aerogerador, ilustrando assim a sua adaptabilidade a sistemas tecnológicos reais.

6 Aplicação dos Modelos Propostos a um Sistema Real

Tendo como base de trabalho os capítulos anteriores, o Capítulo 6 faz uma aplicação real dos modelos de manutenção propostos. O sistema em estudo é o sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador.

No capítulo apresenta-se o funcionamento de um aerogerador, descrevendo exaustivamente os seus principais estados, bem como a política de manutenção aplicada no parque eólico.

De seguida, é aplicado o modelo probabilístico-difuso de manutenção, proposto no Capítulo 5, ao sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador, analisando e comparando os seus resultados com a política de manutenção existente.

Uma contextualização sintética da energia eólica em Portugal pode ser consultada no Anexo B.

6.1 Introdução

O setor das energias renováveis é, em muitos países, um setor de interesse estratégico para expansão económica. A energia eólica, em particular, é uma das fontes mais económicas de geração de eletricidade em grande escala, é compatível com outras utilizações do terreno e pode servir como auxílio ao desenvolvimento económico rural. Além dos benefícios económicos, tem ainda os óbvios benefícios ambientais e de segurança. A energia eólica não produz emissões perigosas ou resíduos sólidos tóxicos, é completamente renovável, altamente fiável e muito eficiente. Compensa, assim, as emissões de outras fontes de energia, reduzindo a contribuição do ser humano para as alterações climáticas globais.

Sendo este, atualmente, um setor emergente e em expansão, têm surgido nos últimos anos muitos trabalhos descritivos acerca das energias renováveis e, em especial, da energia eólica. Contudo, da pesquisa bibliográfica efetuada, não foram encontrados estudos científicos sobre manutenção em parques eólicos. De facto, a informação disponível publicada acerca dos aerogeradores no que respeita à manutenção, e em particular aos custos de manutenção, é escassa ou inexistente. Essa informação porventura existe, mas encontra-se quase exclusivamente com os fabricantes destas máquinas, sendo objeto de confidencialidade.

Pretende-se, neste capítulo, fazer uma aplicação dos modelos desenvolvidos nos capítulos anteriores a um sistema real e, desse modo, avaliar a sua aplicabilidade. O sistema real sob análise é o sistema de controlo ativo de potência de um aerogerador com três pás do rotor e uma potência nominal de 2MW.

Com vista a essa aplicação, é primeiramente realizada uma descrição do aerogerador em análise, dando especial relevo à descrição do sistema particular de controlo ativo de potência que incorpora o aerogerador. É realizada também uma descrição geral dos principais custos de um aerogerador, assim como da política de manutenção dos aerogeradores implementada no parque eólico em estudo, que, em geral, é a implementada em qualquer parque eólico de geração de eletricidade em grande escala.

Seguidamente, é feita uma descrição e análise dos principais estados identificados nos dados recolhidos em dois anos de funcionamento do aerogerador, estudando, depois, com mais detalhe os resultados relativos ao sistema de controlo ativo de potência. Segue-se a aplicação dos modelos desenvolvidos nos capítulos 4 e 5 a este sistema particular, analisando e comparando os resultados com o modelo de manutenção a vigorar na empresa.

6.2 Descrição do aerogerador

Aerogeradores, turbinas eólicas, geradores eólicos, máquinas eólicas e cata-ventos são os diversos nomes utilizados para as máquinas capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia elétrica.

Atualmente, os aerogeradores são a principal tecnologia de produção de energia elétrica a partir da energia do vento.

Todos os aerogeradores, independentemente da sua dimensão, são constituídos pelos seguintes componentes: o rotor (a parte que roda por ação do vento e onde se fixam as pás), o gerador elétrico, um sistema de controlo da velocidade e a torre. Os aerogeradores possuem também um sistema de segurança que, em caso de avaria de algum componente, impede o movimento das pás.

Os aerogeradores mais utilizados são os de eixo horizontal (Figura 6.1 (b)), essencialmente constituídos por uma torre de 50 a 120 m de altura, em cima da qual se encontra o rotor, com três pás na maior parte dos casos (cada pá tem um comprimento de 25 a 45 m), e a *nacelle*⁵, que abriga o gerador propriamente dito, bem como os sistemas de controlo da máquina.

⁵ Cabine localizada no topo da torre do aerogerador onde se localizam os componentes-chave do aerogerador.



(a)



(b)

Figura 6.1 Imagens de aerogeradores: (a) com rotor de eixo vertical; e (b) com rotor de eixo horizontal

O vento põe em movimento as pás, que dão entre 10 a 25 voltas por minuto aproximadamente. O gerador contido na *nacelle* transforma a energia mecânica deste movimento de rotação em energia elétrica. Um controlo automatizado em tempo real permite à *nacelle* girar para estar sempre face ao vento e as próprias pás ajustam permanentemente a sua inclinação para maximizar sempre a energia captada (controlo de potência activo).

Nos dias que correm, as turbinas eólicas mais frequentemente instaladas em parques eólicos têm uma potência de 2 a 3 MW (megawatts), o que significa que um aerogerador deste tipo permite responder às necessidades elétricas de 2000 a 3000 casas.

Geralmente, a energia produzida por qualquer aerogerador aumenta com a velocidade do vento. Contudo, isto acontece apenas até certo limite. Em caso de ventos muito fortes, o aerogerador para e orienta as pás paralelamente ao vento para se proteger (controlo de potência). Os sítios mais ventosos encontram-se geralmente junto ao mar ou no cimo das montanhas, devido ao efeito de aceleração que o relevo tem sobre o vento. Num determinado lugar, a velocidade do vento aumenta normalmente com a

altitude, já que o vento longe do solo sofre menos da fricção com a superfície terrestre, razão pela qual as turbinas são normalmente montadas em torres altas.

6.2.1 Controle de potência

O objetivo de um sistema de controle de potência é impedir que, devido a velocidades de vento elevadas, seja excedida a potência do gerador elétrico, assim como aliviar os esforços sobre a estrutura e componentes do aerogerador.

Há duas formas principais de se agir sobre as forças aerodinâmicas com o objetivo de controlar as cargas e a potência, são elas: o controle passivo (*stall*) e o controle ativo (*pitch*).

Controle de potência passivo

O sistema de controle passivo utiliza um rotor com pás de passo fixo, ou seja, as pás são unidas de forma rígida ao rotor, não permitindo rotação sobre seu eixo longitudinal. Os desenhos das pás são feitos de forma que, quando o vento ultrapassa uma velocidade predefinida, ocorram perdas aerodinâmicas. Há o descolamento da camada limite na borda de saída da pá, aumentando assim o arrasto e diminuindo a força de sustentação, força esta que é, basicamente, a responsável pela movimentação das pás nas turbinas de alta velocidade e baixo torque.

As pás são projetadas de maneira que a potência nominal seja atingida em velocidades de vento relativamente altas e os aerogeradores que possuem controle passivo devem contar com um sistema de freios para os casos de eventuais paragens.

Este sistema apresenta um arranque mais difícil quando comparado a turbinas com controle ativo. Além disso, com o controle passivo, os esforços são elevados para ventos mais fortes, o que exige uma estrutura mais robusta e o gerador elétrico deve ser capaz de suportar sobrecargas consideráveis.

Controle de potência ativo

Outra maneira de se controlar a potência e as cargas num aerogerador é através do controle ativo. No controle ativo as pás podem sofrer rotação sobre o seu eixo longitudinal, o que faz com que seja alterado o ângulo de ataque das pás em relação à

velocidade relativa do vento. Tal processo dá-se, na maioria das vezes, através de sistemas hidráulicos, que respondem a um controlo eletrónico que verifica a potência de saída e, no caso de estar muito alta, aciona o mecanismo.

O controlo ativo, ou controlo por *pitch*, permite outros tipos de controlo sobre o aerogerador, controlos que acabam por otimizar a geração de energia e trazem vantagens em relação ao controlo por *stall*. As principais vantagens que surgem do controlo ativo são, além de limitar a potência para velocidades de vento altas, facilitar a operação de arranque, diminuir os esforços e otimizar a potência quando o aerogerador se encontra a funcionar em carga parcial.

Quando a velocidade do vento supera a velocidade de corte, velocidade máxima para a qual o aerogerador foi projetado, ou para uma operação de manutenção, pode-se configurar as pás de forma que atuem como freio aerodinâmico, parando o movimento do rotor. Estas podem então ser colocadas em posição de bandeira, a fim de minimizar os esforços aerodinâmicos sobre elas e sobre os seus componentes mecânicos. Na Figura 6.2 é mostrado um esquema das diferentes posições da pá, incluindo a posição de bandeira, na paragem do aerogerador.

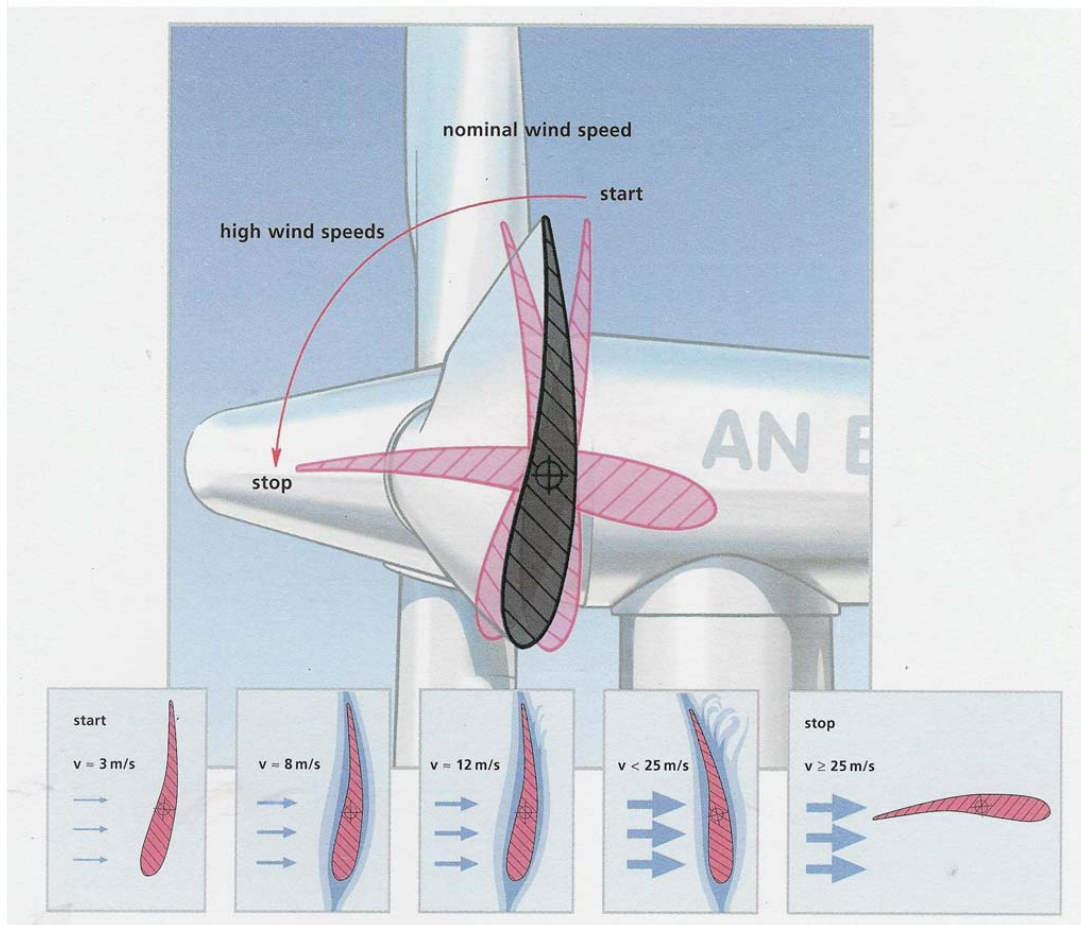


Figura 6.2 Exemplificação do controle de potência ativo

Fonte: AN windenergie , Bonus-Alemanha

A desvantagem deste sistema é o maior custo e complexidade. No entanto, permite maior eficiência na captação da energia do vento, sobretudo na faixa de velocidades compreendida entre a de partida e a nominal, em que o aerogerador opera à carga parcial.

6.2.2 Sistema de orientação

A potência gerada por um aerogerador depende também do ângulo de incidência do vento em relação ao eixo de rotação das pás, ou seja, para o melhor aproveitamento da potência disponível no vento e evitar esforços que aparecem em virtude da desorientação, a direção do vento deve ser perpendicular ao plano de rotação do rotor. Como a direção de incidência do vento é variável, torna-se necessário um sistema de orientação, que tem como objetivo girar toda a *nacelle* para a melhor posição em cada

instante. Nestas circunstâncias, a velocidade de orientação deve ser baixa para evitar o aparecimento de esforços elevados devidos à rotação.

Durante o processo de orientação do aerogerador pode dar-se a necessidade de se desenrolar os cabos que sobem da torre para a *nacelle*, pois durante a orientação os mesmos são torcidos, o que pode resultar na sua rutura. Para se evitar tal rutura, após o rotor realizar um determinado número de voltas em torno do eixo da torre, inicia-se um movimento no sentido contrário para que os cabos retornem ao estado inicial.

6.2.3 Esforços sobre os aerogeradores

Os esforços exercidos nos aerogeradores podem ter duas origens: i) aerodinâmicas, que surgem da atuação do vento sobre o rotor; e ii) inerciais, que são produzidas pelo movimento das partes, pela gravidade e pela força centrífuga no rotor e nas pás, devido à rotação e peso dos componentes. A carga inercial verifica-se essencialmente em aerogeradores de grande porte.

O controlo dos esforços exercidos na máquina, independentemente do tipo, são constantemente monitorizados.

6.2.4 Custos de um aerogerador

Um aerogerador pressupõe os seguintes custos essenciais:

- Custo inicial de investimento (custo da turbina, dos terrenos, da construção civil, da ligação à rede), acrescido, na maior parte dos casos, do custo do financiamento bancário necessário ao investimento.
- Custos de operação e manutenção ao longo da vida. Ao contrário das centrais elétricas térmicas, no caso de aerogeradores, o investimento inicial é o custo predominante, já que não existem custos de combustível e que os restantes custos de operação são relativamente reduzidos. Isso tem vantagens e inconvenientes: por um lado, significa que o custo do sistema é muito previsível e independente das variações futuras dos custos de matérias-primas e, portanto, um aerogerador pode servir como um seguro contra as incertezas do mercado da energia. Mas, ao mesmo tempo, o elevado investimento inicial jogou, durante

muitos anos, contra a energia eólica, em particular por causa do sistema de atualização, um princípio de contabilidade que dá maior importância aos custos e receitas presentes do que aos distantes no futuro: com este sistema, uma central térmica, que tem menos custos à partida e mais ao longo dos anos, é vantajosa em relação a um investimento numa central eólica. Nos últimos anos, a implementação por parte dos governos europeus de enquadramentos legislativos favoráveis destinados a dar perspectivas claras aos investidores, tem permitido ultrapassar o desafio do investimento inicial elevado e em 2008 instalaram-se na Europa mais MW de energia eólica do que qualquer outra fonte de eletricidade. O elevado custo fixo inicial de um aerogerador significa também que é imprescindível maximizar a utilização do equipamento, nomeadamente através de uma boa manutenção para garantir uma longa vida útil. É também importante colocar os aerogeradores nos sítios onde há mais vento, já que o custo do investimento é idêntico e a energia produzida pode ser em maior quantidade, obtendo-se assim um menor custo por kW de energia produzida.

6.2.5 Descrição da política de manutenção do aerogerador

A manutenção dos aerogeradores é realizada inteiramente pelo fabricante. No caso real tratado neste capítulo, o contrato que a empresa detentora do aerogerador tem com o fabricante pressupõe a execução de quatro intervenções por ano, por aerogerador, realizadas com intervalos trimestrais. Especificamente, são realizadas uma manutenção preventiva à parte elétrica, uma manutenção preventiva à parte mecânica, uma inspeção visual e uma também uma operação de lubrificação. Ao fabricante compete ainda toda e qualquer manutenção corretiva que se imponha, assim como alguma manutenção de melhoria que considere fundamental. Este serviço prestado pelo fabricante constitui uma condição necessária para oferecer garantia e custa à empresa 38 mil euros por ano, por aerogerador. Na realidade, não é possível saber-se os valores exatos relativos a cada manutenção preventiva e/ou corretiva, uma vez que o contrato estabelecido com a empresa que gere o parque eólico é formalizado com o fabricante como uma avença anual durante 20 anos, podendo sofrer acréscimos ou decréscimos dos valores, no caso de grande produtividade da máquina ou, pelo contrário, no caso de a máquina não cumprir uma disponibilidade mínima anual garantida pelo fabricante (95% por máquina e 98% por parque, respectivamente). Findo este período o contrato terá que ser revisto.

Os custos de manutenções preventivas, corretivas e substituições relacionadas com o sistema de controlo ativo de potência são ainda mais difíceis de estimar. Sabem-se apenas valores aproximados provenientes da experiência dos técnicos e especialistas, desta e de outras empresas consultadas, que trabalham no setor. Estas estimativas são analisadas na Secção 6.4.2.

6.3 Dados recolhidos

Foram fornecidos os dados de 21 aerogeradores iguais, de um mesmo parque eólico localizado em Portugal continental, relativos aos anos 2009 e 2010. O parque eólico que disponibilizou a informação é detentor de mais do que um tipo de aerogerador. A seleção do tipo de aerogerador do parque a analisar assentou em dois critérios: i) ser o mais recente; e ii) ser em maior número do que os restantes. O aerogerador em estudo possui três pás do rotor, controlo de potência ativo e uma potência nominal de 2MW.

Os dados disponibilizados de interesse para o estudo englobam o registo do momento exato da ocorrência de um determinado estado em cada aerogerador, bem como a velocidade do vento no instante dessa mesma ocorrência, conforme a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Exemplo da estrutura do registo dos dados

<i>Data</i>	<i>Horas</i>	<i>Minutos</i>	<i>Segundos</i>	<i>Aerogerador</i>	<i>Estado</i>	<i>Velocidade vento (m/s)</i>
15-07-2009	21	10	57	1	E9	6,2
15-07-2009	21	10	58	1	E9	5,3
15-07-2009	21	28	43	1	E8	3,5
15-07-2009	21	28	48	1	E1	2,3
15-07-2009	21	28	52	1	E2	2,5

Na amostra detetaram-se em média 6237 registos ou ocorrências por aerogerador, com desvio padrão de 1851 registos.

6.3.1 Identificação dos principais estados do aerogerador

Pela análise dos dados de 2009 e 2010, verifica-se que, em média, o sistema de controlo de um aerogerador tem 260 registos por mês. O fabricante reconhece nesses registos cerca de 125 estados possíveis. No entanto, em 2009 e 2010, nas turbinas analisadas foram encontrados apenas 69 estados diferentes registados, sendo que uns se revelaram

mais frequentes e mais permanentes do que outros. Efetivamente, desses 69 estados, muitos deles ocorreram com pouca frequência. A Tabela 6.2 mostra os onze estados mais frequentes.

Tabela 6.2 Listagem dos onze estados mais frequentes

<i>Estado i (Ei)</i>	<i>Designação</i>
E1	Turbina em operação
E2	Falta de vento
E3	Controlo remoto
E4	Falha de rede
E5	Manutenção
E6	Cabo torcido
E7	Falha de alimentação
E8	Turbina (<i>reset</i>)
E9	Falta de controlo de carga da pá
E10	Falha de controlo de guinada
E11	Erro no controlo de potência ativo

Pelo gráfico da Figura 6.3 pode fazer-se uma comparação quantitativa entre os 11 estados mais observados.

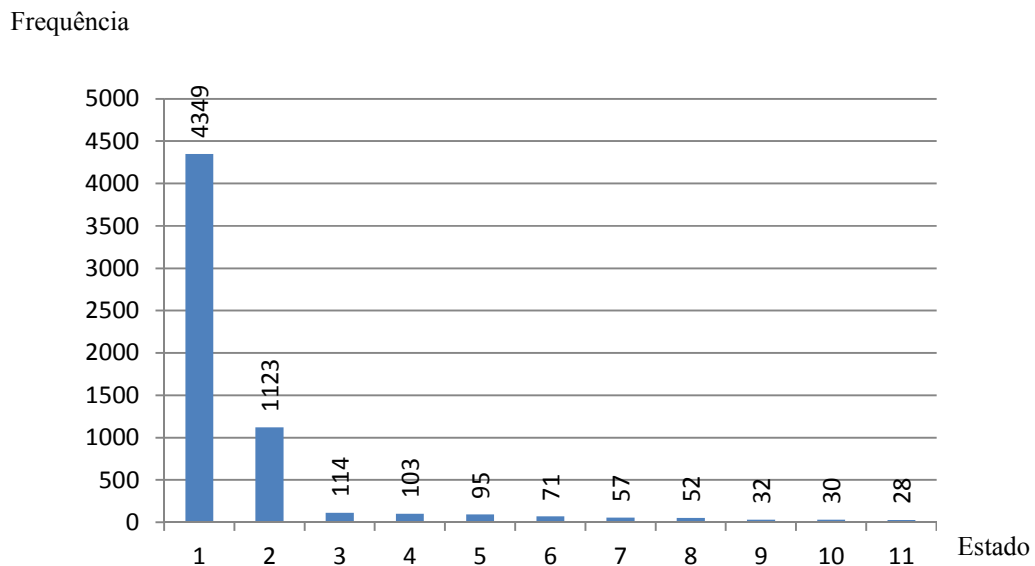


Figura 6.3 Frequência média dos onze estados mais frequentes, por máquina, em dois anos

Como é evidente, o estado mais frequente é o estado E1 (*turbina em operação*), evidenciando o normal funcionamento do aerogerador.

Para além da frequência dos estados, é também de particular interesse o tempo de permanência do aerogerador em cada um dos estados. Note-se que, se o estado representar uma falha, e conseqüente paragem, o tempo de permanência nesse estado representará tempo de indisponibilidade da máquina, o que muito possivelmente acarretará perda de produção de energia. A Tabela 6.3 apresenta a listagem dos onze estados com maior tempo de permanência.

Tabela 6.3 Listagem dos onze estados com maior tempo de permanência

<i>Estado i (Ei)</i>	<i>Designação</i>
E1	Turbina em operação
E2	Falta de vento
E5	Manutenção
E3	Controlo remoto
E12	Deteção de gelo
E6	Cabo torcido
E11	Erro no controlo de potência ativo
E9	Falha no controlo de carga da pá
E13	Interface do anemómetro
E14	Disjuntor não protegido
E10	Falha no controlo de guinada

A Figura 6.4 permite fazer, também, uma comparação quantitativa entre os estados identificados com maior tempo de permanência.

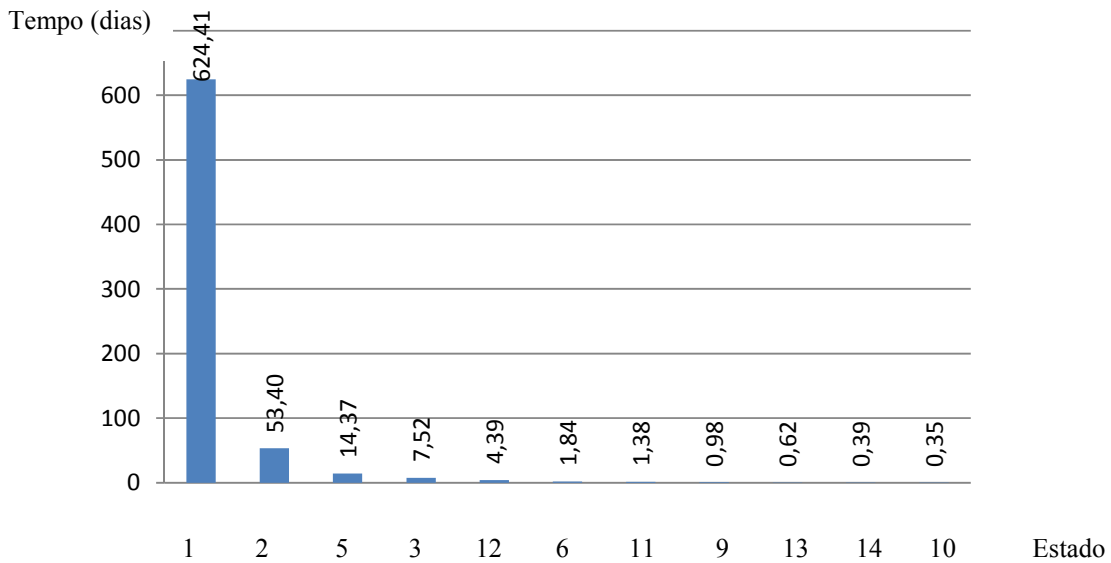


Figura 6.4 Tempo médio (em dias) de permanência em cada um dos onze estados com maior tempo de permanência, por máquina, em dois anos

A Tabela 6.2 e a Tabela 6.3 diferem em três estados. Assim, dos onze estados considerados em cada uma das tabelas, oito deles são coincidentes, o que significa que os oito estados considerados como mais frequentes são também considerados como os mais permanentes e vice-versa. Da união dos dois conjuntos de estados (os onze estados mais frequentes e os onze estados mais permanentes) resulta um conjunto de catorze estados, que se designa aqui por espaço de estados do aerogerador.

6.3.2 Descrição dos principais estados do aerogerador

Para uma melhor compreensão do funcionamento do aerogerador, faz-se seguidamente uma descrição mais detalhada dos catorze estados considerados mais importantes, sob o ponto de vista da frequência e permanência no estado, referidos na secção anterior.

- **Estado E1 - Turbina em operação:** corresponde a um estado de normal funcionamento, no qual o aerogerador trabalha sem problemas técnicos e com fatores ambientais adequados (nem há falta de vento, nem há tempestade). Durante este estado, as condições do vento são continuamente determinadas e o posicionamento na *nacelle* e das pás do rotor são ajustados para otimizar a energia produzida. Todos os estados daí decorrentes são registados. O aerogerador está em pleno funcionamento, embora a energia produzida dependa da velocidade do vento.

- **Estado E2 - Falta de vento:** o aerogerador está disponível, mas a velocidade do vento é menor do que o mínimo requerido para haver produção (2 m/s). Atingindo a velocidade mínima de 2 m/s, o aerogerador reinicia automaticamente.
- **Estado E3 - Controle remoto:** Cada aerogerador está equipado com um sistema de monitorização de controlo remoto, que deve estar operacional 24 horas por dia. Este equipamento possibilita a obtenção de informação constantemente atualizada sobre o estado da máquina, assim como históricos de dados. Por ser um equipamento totalmente independente do aerogerador, o estado E3 não representa uma falha no aerogerador, mas significa que a máquina está sem comunicação, ou seja, não é possível aceder remotamente. Nesta situação, o aerogerador pode estar sem comunicação e, no entanto, estar em pleno funcionamento.
- **Estado E4 - Falha de rede:** Este estado não representa uma falha no aerogerador, mas antes uma falha na rede elétrica utilizada. Se um número predefinido de falhas na rede foi excedido, o aerogerador não reinicia automaticamente. Note-se que, apesar de este ser um estado muito frequente, não constitui um estado muito permanente do aerogerador (o estado E4 não está incluído nos estados mais permanentes), pelo que se supõe que esta última situação se verifique raramente.
- **Estado E5 - Manutenção:** As ações de manutenção são efetuadas pelo fabricante da máquina e podem ser planeadas ou, pelo contrário, corretivas por ocorrência de alguma falha. O aerogerador está indisponível durante este estado.
- **Estado E6 - Cabo torcido:** os cabos de potência e controlo localizados na torre têm uma grande liberdade de movimentos, permitindo à *nacelle* rodar várias vezes na mesma direção sobre o seu eixo. Durante este processo, os cabos são gradualmente torcidos. Depois de duas ou três voltas dos cabos, o aerogerador aproveita o período seguinte de baixa velocidade do vento para a distorção automática dos cabos. Se a velocidade do vento for elevada e não permitir, o aerogerador para ao fim de três voltas completas e os cabos são distorcidos independentemente da velocidade do vento.

- **Estado E7 - Falha de alimentação:** este estado representa uma falha na conversão da potência produzida pelo aerogerador em voltagem apropriada para a rede utilizada. Esta ocorrência conduz à paragem do aerogerador.
- **Estado E8 - Aerogerador (*reset*):** este estado ocorre quando, após uma tentativa automática de reiniciar (depois de um qualquer estado que permita reinício automático), o aerogerador não consegue fazê-lo. Surge, então, um *reset* manual, que pode ser remotamente, do aerogerador.
- **Estado E9 - Falha no controlo de carga da pá:** o controlo de esforço no aerogerador é constantemente controlado. O estado E9 significa que foi exercido na pá um esforço excessivo. O aerogerador continua operacional, apesar de com potência reduzida. O serviço de manutenção tem que retificar os efeitos do esforço. O estado E9 influencia ativamente o estado E11.
- **Estado E10 - Falha no controlo de guinada:** a direção e a velocidade do vento são constantemente medidas. Se o desvio entre a direção dos eixos do rotor e a direção do vento monitorizada for muito grande, a posição da *nacelle* é corrigida. O ângulo que evidencia esse desvio e o tempo despendido para corrigir a posição da *nacelle* em relação ao vento variam de acordo com a velocidade do vento. O estado E10 ocorre quando o desvio médio da orientação do rotor em relação à direção do vento é maior do que um ângulo predefinido ou quando a *nacelle* roda três vezes na mesma direção sobre o seu eixo. Neste caso, o aerogerador para (ver estado E6).
- **Estado E11 - Erro no controlo de potência ativo:** o aerogerador tem um dispositivo de controlo de potência que visa ajustar os ângulos das pás do rotor de forma a otimizar a potência conseguida através da velocidade do vento e, deste modo, garantir um uso efetivo da energia do vento. Os ângulos das três pás são constantemente controlados. Quando existe uma diferença nos ângulos das pás (ainda que erradamente, devido a uma falha de medição), surge o estado E11, que conduz à paragem do aerogerador. A máquina reinicia automaticamente. Se o problema persistir um predefinido número de vezes, o serviço de manutenção terá que reparar a falha.

- **Estado E12 - Detecção de gelo:** a acumulação de gelo ou geada reduz severamente a sustentação aerodinâmica das pás do rotor, resultando num decréscimo da eficiência do aerogerador, podendo mesmo constituir perigo para as pessoas em redor e para a própria máquina. A deteção de gelo é, por isso, de extrema importância. Assim, se a temperatura for inferior a 2°C (pressupõem-se condições para a formação de gelo), o aerogerador é automaticamente desligado.
- **Estado E13 - Falha no interface do anemómetro:** este estado ocorre quando há um erro na informação recolhida pelo anemómetro (aparelho indicador da velocidade do vento). O aerogerador para.
- **Estado E14 - Ativação do disjuntor de proteção:** este estado indica que o disjuntor de proteção foi acionado devido a uma sobrecarga de corrente elétrica. Nestas situações, o aerogerador para e assim permanece até uma verificação, pela equipa de manutenção, de eventuais efeitos.

Dos estados descritos acima, há dois que têm especial interesse neste estudo: o estado E9 e o estado E11, uma vez que estão relacionados com o sistema de controlo de potência ativo do aerogerador.

6.4 Sistema de controlo de potência ativo

Os estados E9 e E11 são considerados frequentes e permanentes. Analisando os estados com maior tempo de permanência do que os estados E9 e E11 (Tabela 6.3), constata-se que nenhum deles representa ou pode representar uma falha, além de que nem todos representam sequer uma paragem do aerogerador. Acresce que o sistema de controlo de potência revela-se de primordial importância no que respeita à segurança do aerogerador. Uma falha neste sistema, combinada com uma situação climatérica adversa (por exemplo, uma tempestade) pode conduzir a um descontrolo na velocidade de rotação das pás e ter consequências catastróficas, podendo inclusivamente culminar na destruição total do aerogerador. Um estado que influencia ativamente a fiabilidade do sistema de controlo de potência ativo é o estado E9 (deteção de uma carga excessiva na(s) pá(s) do rotor). Também por esta razão, este estado é estudado mais pormenorizadamente, analisando e evidenciando possíveis relações de dependência entre os estados E9 e E11.

6.4.1 Análise dos estados E9 e E11

Nesta secção apresenta-se uma análise exaustiva da ocorrência dos estados E9 e E11 nos 21 aerogeradores envolvidos no estudo nos anos 2009 e 2010. A Figura 6.5 mostra a frequência desses estados, por máquina, em dois anos.

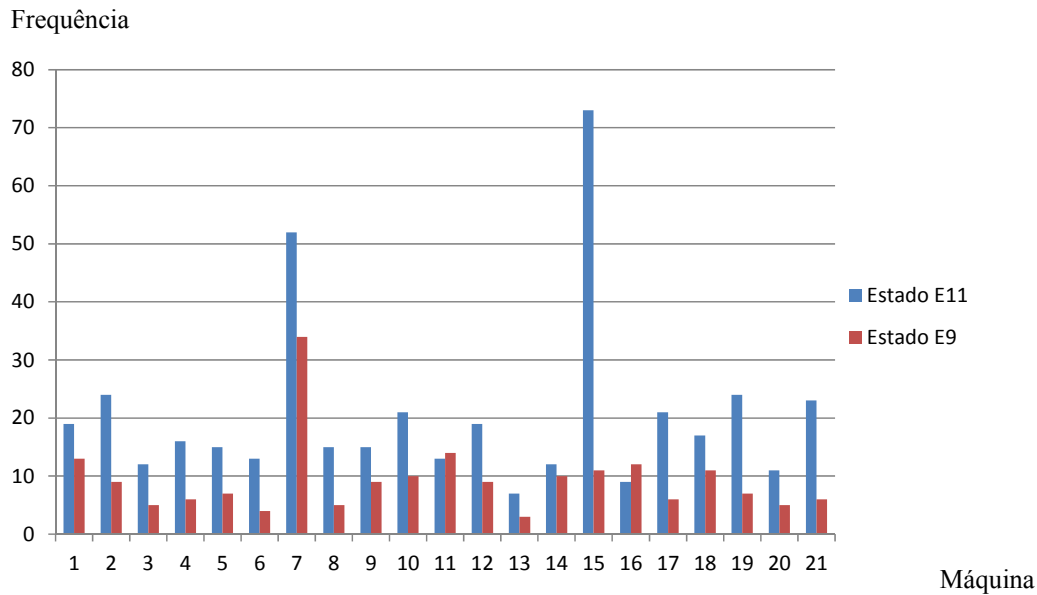


Figura 6.5 Frequência dos estados E11 e E9, por máquina, em dois anos

É de notar que o Estado E11 conduz à paragem do aerogerador. O Estado E9, apesar de não conduzir a um estado de indisponibilidade absoluta, leva o aerogerador para um estado operativo em esforço e de potência reduzida, o que é indesejável, tanto pela influência que este estado pode ter no Estado 11, como também pela perda de produção de energia inerente a um funcionamento condicionado. A Tabela 6.4 apresenta resumidamente a frequência, a duração e o conseqüente *custo de indisponibilidade*⁶ do estado E11, por aerogerador, em dois anos. Resultados mais detalhados podem ser consultados no Anexo C.

⁶ O custo de indisponibilidade provém da perda de produção por paragem ou por mau funcionamento do sistema de controlo ativo de potência.

Tabela 6.4 Descrição sucinta do estado E11 nas 21 máquinas nos anos 2009 e 2010

	N.º de ocorrências	Tempo indisponível (hh:mm:ss)	Custo Indisponibilidade (€)
Máquina 1	19	25:02:21	4238,34
Máquina 2	24	40:04:07	3678,24
Máquina 3	12	102:29:58	13004,88
Máquina 4	16	30:10:29	1655,12
Máquina 5	15	70:51:48	7989,76
Máquina 6	13	150:01:48	11954,29
Máquina 7	52	199:28:26	22613,98
Máquina 8	15	74:52:52	9942,31
Máquina 9	15	22:10:43	3310,77
Máquina 10	21	105:49:33	4960,38
Máquina 11	13	42:58:04	5460,92
Máquina 12	19	64:43:34	2426,08
Máquina 13	7	20:26:23	2976,49
Máquina 14	12	19:13:29	1054,58
Máquina 15	73	169:52:10	20512,15
Máquina 16	9	58:15:51	2625,14
Máquina 17	21	296:50:03	1016,93
Máquina 18	17	15:56:08	859,99
Máquina 19	24	44:35:36	2680,60
Máquina 20	11	19:31:45	2272,95
Máquina 21	23	36:07:44	4499,31
TOTAL	431	1609:32:52	129733,2

Relativamente ao estado E11, verificaram-se 431 falhas nos 21 aerogeradores nos anos 2009 e 2010, que resultaram num custo total de indisponibilidade neste período de 129733,2€. Cada falha teve, em média, uma duração aproximada de 4 horas e um custo de indisponibilidade de 301€.

A Tabela 6.5 apresenta, também de modo resumido, a frequência, a duração e o consequente custo de indisponibilidade do estado E9 por aerogerador, no período de dois anos. Resultados mais detalhados podem ser consultados no Anexo D.

Tabela 6.5 Descrição sucinta do estado E9 nas 21 máquinas nos anos 2009 e 2010

	N.º de ocorrências	Tempo indisponível (hh:mm:ss)	Custo Indisponibilidade (€)
Máquina 1	13	45:51:39	7937,35
Máquina 2	9	3:38:29	430,03
Máquina 3	5	29:50:09	2062,18
Máquina 4	6	40:39:45	3317,17
Máquina 5	7	23:54:58	4116,96
Máquina 6	4	101:33:18	14475,69
Máquina 7	34	147:31:25	22322,40
Máquina 8	5	26:24:51	3609,12
Máquina 9	9	42:55:49	4626,94
Máquina 10	10	26:51:57	4945,14
Máquina 11	14	39:08:07	6794,74
Máquina 12	9	145:50:09	3260,08
Máquina 13	3	64:27:26	5319,53
Máquina 14	10	12:17:27	2006,23
Máquina 15	11	94:17:37	7117,12
Máquina 16	12	36:51:07	4005,19
Máquina 17	6	8:58:39	1656,35
Máquina 18	11	7:10:01	1317,56
Máquina 19	7	20:54:40	3858,10
Máquina 20	5	8:43:11	1204,83
Máquina 21	6	22:04:24	3893,69
TOTAL	196	949:55:08	108276,4

Pela Tabela 6.5 constata-se que houve 196 falhas relacionadas com o estado E9, as quais resultaram num custo total de indisponibilidade de 108276,4€. Isto significa que cada falha teve, em média, uma duração aproximada de 5 horas e um custo de indisponibilidade de 552,4€.

Os custos de indisponibilidade evidenciados na última coluna da Tabela 6.4 e da Tabela 6.5 foram obtidos com o conhecimento da velocidade do vento, constante em cada registo, e da relação da potência com a velocidade do vento, dada na Figura 6.6. Os dados relativos à velocidade média do vento e a respetiva potência desperdiçada pelo aerogerador, resultante do aparecimento dos estados E11 e E9, respetivamente, podem ser consultados nos anexos C e D.

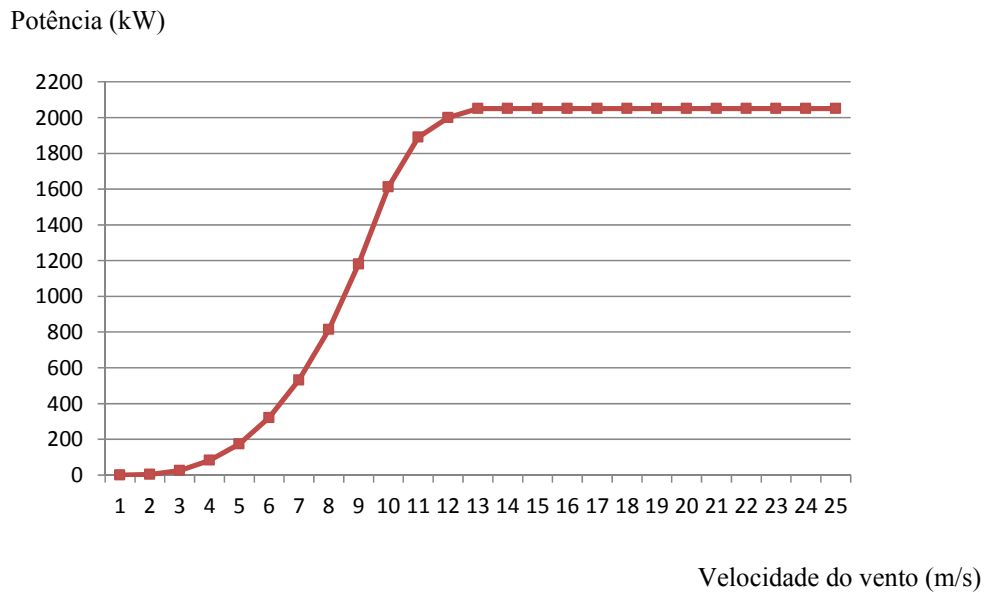


Figura 6.6 Curva de potência em função da velocidade do vento

A energia desperdiçada na ocorrência de cada estado é dada por:

$$\text{Energia (MW/h)} = (\text{Potência} \times \text{Duração da ocorrência}) / 1000 \quad (6.1)$$

O custo de indisponibilidade foi calculado, sabendo que a energia produzida de 1MW/h é vendida a 90€.

6.4.2 Custos de manutenção do sistema de controlo de potência ativo

Os custos de manutenção relacionados com os dois estados evidenciados no estudo, E11 e E9, são muito difíceis de estimar. A informação constante nos dados é a única fonte de informação oficial que a própria empresa detentora do parque eólico dispõe. Da informação disponível, e com interesse para a análise dos custos de manutenção, destacam-se o registo do momento exato da ocorrência de cada estado em cada aerogerador e a velocidade do vento no instante dessa mesma ocorrência.

Tal informação, como se viu na secção anterior, permite estimar os custos de indisponibilidade, relativos aos estados E11 e E9, assim como o número de manutenções corretivas e preventivas levadas a cabo nos dois anos do estudo. No entanto, os custos das manutenções corretivas e preventivas e das substituições efetuadas não são dados a conhecer pelo fabricante, sabendo-se apenas valores aproximados provenientes da experiência dos peritos, desta e de outras empresas que

gerem parques eólicos e que foram consultados no desenvolvimento deste trabalho. A informação recolhida não resulta, portanto, de análises estatísticas, mas sim de declarações de especialistas, baseados no seu conhecimento e experiência. Deste modo, recorre-se à Teoria dos conjuntos Difusos para tratar a incerteza inerente a esta informação, por se considerar uma teoria adequada nestas circunstâncias.

Relativamente a manutenções preventivas ao sistema de controlo de potência ativo, os especialistas referiram o seguinte:

- *60€/h homem, tendo de se considerar sempre 2 homens e 4 horas de serviço.
Logo, aproximadamente 480€*
- *Lubrificantes - 100€*
- *Peças - Variável (pode não levar nada)*
- *Deslocação - Variável, adicionalmente não se faz este serviço isoladamente*

Segundo tal informação, pode dizer-se que uma manutenção preventiva ao sistema de controlo de potência ativo custa, no mínimo, 580€ e que o tempo para a sua realização ronda as 4 horas de serviço (o que representa um custo de indisponibilidade aproximado de 293€, devido à manutenção preventiva, assumindo uma velocidade média do vento de 8m/s).

Relativamente a manutenções corretivas ao sistema de controlo de potência ativo, os peritos consultados referem que, quando a equipa de manutenção é chamada a intervir na ocorrência de um erro neste sistema, a manutenção consiste, normalmente, na substituição do motor da pá na qual foi detetado o erro. No sentido de garantir a disponibilidade da máquina, as reparações nunca são feitas no local. O motor é substituído e, posteriormente, é reparado na fábrica. Os técnicos indicam que o custo de cada motor *ronda* os 2000€.

Quando a equipa de manutenção intervém numa falha de controlo de carga, normalmente é feita uma substituição do sensor que, de alguma forma, quantifica a carga (flexão, esforço, curvatura) exercida na pá. Um sensor novo *ronda* os 50€.

Note-se que a reparação não se realiza sempre que é detetado um dos estados E11 ou E9. O aerogerador tem mecanismos de reação a estas falhas. O erro manifestado pelo

estado E11, apesar de ser um erro de paragem obrigatória, tem reinício automático. No caso de este reinício falhar três vezes tem que vir a manutenção corrigir a situação. O erro E9 não é de paragem obrigatória, mas antes de perda de potência e exige mão humana para reinício com potência normal (estado E8), o que não significa que haja sempre intervenção de manutenção. Esta apenas ocorre quando o estado E8 não consegue colocar a máquina em normal funcionamento.

Pela análise dos dados dos 21 aerogeradores nos anos 2009 e 2010, das 431 ocorrências do estado E11 registadas resultaram 53 reparações (substituições), isto é, 12,3% das ocorrências necessitaram de intervenção técnica. Já das 196 ocorrências do estado E9, 44 desencadearam uma manutenção corretiva, o que corresponde a 22,4% das ocorrências.

Resta referir que todas as ocorrências dos estados E11 e E9 em 2009 e 2010 foram imediatamente detetadas e registadas no sistema de controlo de cada aerogerador. Aliás, a probabilidade de não deteção de uma avaria no sistema de controlo de potência ativo é ínfima, já que seria necessário que houvesse falha de comunicação (estado E3) e, simultaneamente, uma falha no sistema de controlo de potência ativo (denotada pelo estado E11). Na eventualidade remota de uma ocorrência deste tipo, as consequências são imprevisíveis. Quando combinada com ventos fortes ou tempestades, a ocorrência pode conduzir a um descontrolo na velocidade de rotação das pás e ter efeitos devastadores, que podem incluir a destruição total do aerogerador, no caso de um embate, a alta velocidade, de uma pá na torre, para além do risco que a situação traria a tudo o que é circundante. Obviamente, os custos seriam muito elevados.

Os técnicos referem, ainda, que substituir todo o sistema de controlo de potência ativo de uma pá custará *perto de* 10000€. Substituir o sistema das três pás rondará, portanto, 30000€.

Concretamente, nos anos de 2009 e 2010, o custo total de manutenção do sistema de controlo de potência ativo das 21 máquinas, vem dado pela seguinte expressão:

$$C=2000*(n.^{\circ} \text{ de CM_E11})+50*(n.^{\circ} \text{ de CM_E9})+8*21*(C_{MP}+C_{U_MP})+C_{U_E11}+C_{U_E9}$$

(6.2)

onde:

C: custo total de manutenção do sistema de controlo de potência ativo, dos 21 aerogeradores, em 2009 e 2010

CM_E11: manutenção corretiva do estado E11

CM_E9: manutenção corretiva do estado E9

C_{MP}: custo de manutenção preventiva ao sistema de controlo ativo de potência

C_{U_MP}: custo de indisponibilidade devido a manutenção preventiva

C_{U_E11}: custo de indisponibilidade pela ocorrência do estado E11

C_{U_E9}: custo de indisponibilidade pela ocorrência do estado E9

Segundo as informações obtidas acerca dos custos, poder-se-á estimar que o valor despendido na manutenção do sistema de controlo ativo de potência dos 21 aerogeradores do parque, nos dois anos sob análise, foi:

$$C \cong 2000*53 + 50*44 + 8*21*(580+293) + 129733 + 108276 \cong 492873\text{€}$$

Logo, em média, o custo de manutenção anual de cada sistema de controlo de potência ativo rondou 11735€.

Note-se que a única informação disponível relativamente aos custos de manutenção é aquela que vigora a nível contratual entre a empresa e o fabricante, isto é, 38000€ por ano por aerogerador. Estima-se, então, que, desse valor, 11735€ se destinem a manutenção específica do sistema de controlo ativo de potência, o que corresponde a aproximadamente 32€ por dia por cada sistema concreto.

6.5 Aplicação dos modelos ao sistema de controlo de potência ativo

Nesta secção pretende-se uma aplicação prática do modelo de manutenção desenvolvido no Capítulo 5, sendo este um extensão do modelo de manutenção anteriormente proposto no Capítulo 4. O recurso a um modelo de manutenção probabilístico-difuso prende-se com o facto de a informação disponível ser difusa, dependendo muitas vezes

de juízos e conhecimentos dos técnicos, como se referiu na secção anterior. O modelo é aplicado ao sistema de controlo ativo de potência do aerogerador, sistema responsável pela ocorrência dos estados E11 e E9 no aerogerador.

A Secção 6.5.1 faz, através da distribuição de Weibull, a modelação das ocorrências E11 e E9. Na Secção 6.5.2 analisam-se o período e o custo ótimos de manutenção do sistema de controlo ativo de potência em duas situações distintas: 1^a) todos os parâmetros são considerados rígidos e 2^a) os parâmetros são considerados rígidos e difusos.

6.5.1 Modelação das ocorrências

Pretendia-se, aqui, a modelação das ocorrências dos estados E11 e E9, nos anos 2009 e 2010, relativos a 21 aerogeradores de um parque eólico localizado em Portugal continental.

Apesar de ser um parque eólico recente, com um sistema de controlo remoto eficiente e com registos muito detalhados, não foi fácil obter estimativas ou juízos relativamente a determinados parâmetros para os quais não havia informação. A esmagadora maioria das ocorrências que dizem respeito a problemas técnicos é resolvida pelo fabricante, sem que a administração do parque tome conhecimento das soluções e custos envolvidos.

Já depois do estudo efetuado no parque, com base nos anos 2009 e 2010, tomou-se conhecimento de que o fabricante teria levado a cabo, no início de 2010, uma ação de manutenção de melhoria, a qual iria atuar precisamente no sistema de controlo ativo de potência, com implicações previsíveis na taxa de ocorrência dos estados E11 e E9 desde então. Neste sentido, consideram-se apenas os dados referentes ao ano de 2009 para a modelação da ocorrência dos estados E11 e E9.

6.5.1.1 Modelação das ocorrências do estado E11

No ano de 2009 registaram-se 326 tempos entre ocorrências do estado E11. O estado E11 é um estado de paragem obrigatória, que tem reinício automático. Se o estado persistir, isto é, no fim de três vezes de registo de ocorrência, a equipa de manutenção do fabricante tem que reparar o erro. No entanto, o espaço temporal entre essas três

ocorrências não é especificado, nem no manual de utilização, nem nas palavras dos peritos. Posto isto, assume-se que registos de tempos entre ocorrências inferiores a um dia são considerados como a mesma ocorrência, já que se interpreta a segunda ocorrência mais como uma reincidência da primeira, do que propriamente como uma ocorrência independente e individual. Por outro lado, espaçamentos temporais excessivamente grandes e discrepantes face aos restantes (foram encontrados 5 registos com estas características) são também excluídos da análise. Feitas estas considerações, restam 162 registos que se acredita serem os mais representativos de erros no sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador (estes registos constam do Anexo G). Através do *software Minitab 15* foi realizada a aproximação dos dados à distribuição de Weibull, obtendo os resultados evidenciados na Figura 6.7.

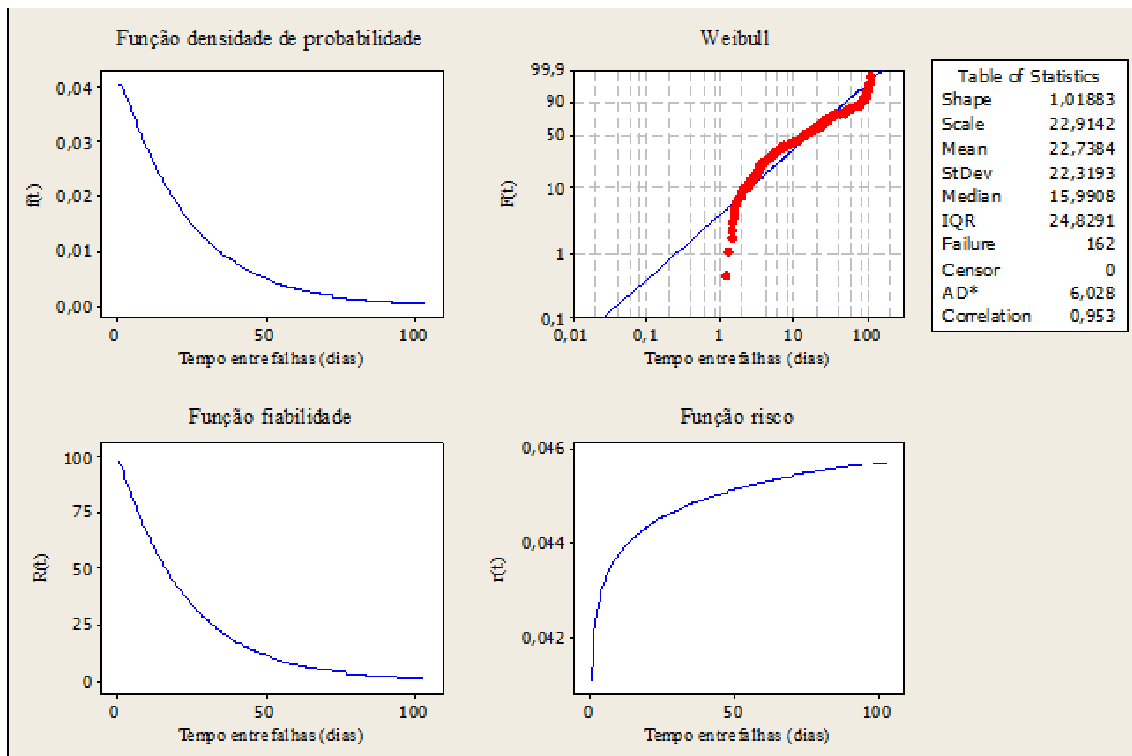


Figura 6.7 Gráficos de Weibull dos valores da tabela do Anexo G relativos ao estado E11

A partir dos parâmetros da distribuição de Weibull e das funções matemáticas apresentadas na Secção 2.7 obtêm-se as seguintes funções para o sistema de controlo de potência ativo:

Função fiabilidade:
$$R_1(t) = e^{-\left(\frac{t}{22,914}\right)^{1,019}}$$

Função de risco:
$$r_{1,0}(t) = 0,042t^{0,019}$$

Função de risco acumulada:
$$H_1(t) = 0,041t^{1,019}$$

Função densidade de probabilidade:
$$f_1(t) = 0,042t^{0,019}e^{-\left(\frac{t}{22,914}\right)^{1,019}}$$

6.5.1.2 Modelação das ocorrências do estado E9

O ano de 2009 apresenta 117 tempos entre ocorrências do estado E9. Assume-se que registos de tempos entre ocorrências inferiores a dois dias e meio seriam considerados como a mesma ocorrência, já que se interpreta a segunda ocorrência mais como uma reincidência da primeira, do que propriamente como uma ocorrência independente e individual. Na descrição deste estado, o manual de instruções do aerogerador refere que sempre que seja detetado o estado E9, o aerogerador, apesar de operacional, continua a trabalhar com potência reduzida, salientando a necessidade do serviço de manutenção retificar a falha. O manual refere, ainda, que em situações extremas de excesso de carga, o aerogerador recorre ao sistema de controlo de potência ativo para ajustar a carga nas pás, podendo o estado E9, desta forma, influenciar a ocorrência do estado E11. A análise dos dados, quando confrontada com a intervenção das equipas de manutenção, sugere que ocorrências com espaçamentos inferiores a 2,5 dias dizem respeito à mesma falha. Por outro lado, espaçamentos temporais excessivamente grandes e discrepantes face aos restantes (foram também encontrados 5 registos com estas características) são também excluídos da análise. Feitas estas considerações, restam 57 registos que se acredita serem os mais representativos de erros no controlo de carga na(s) pá(s) de um aerogerador. Estes registos constam do Anexo H. Através do *software Minitab* 15 foi realizada a aproximação dos dados à distribuição de Weibull, obtendo os resultados evidenciados na Figura 6.8.

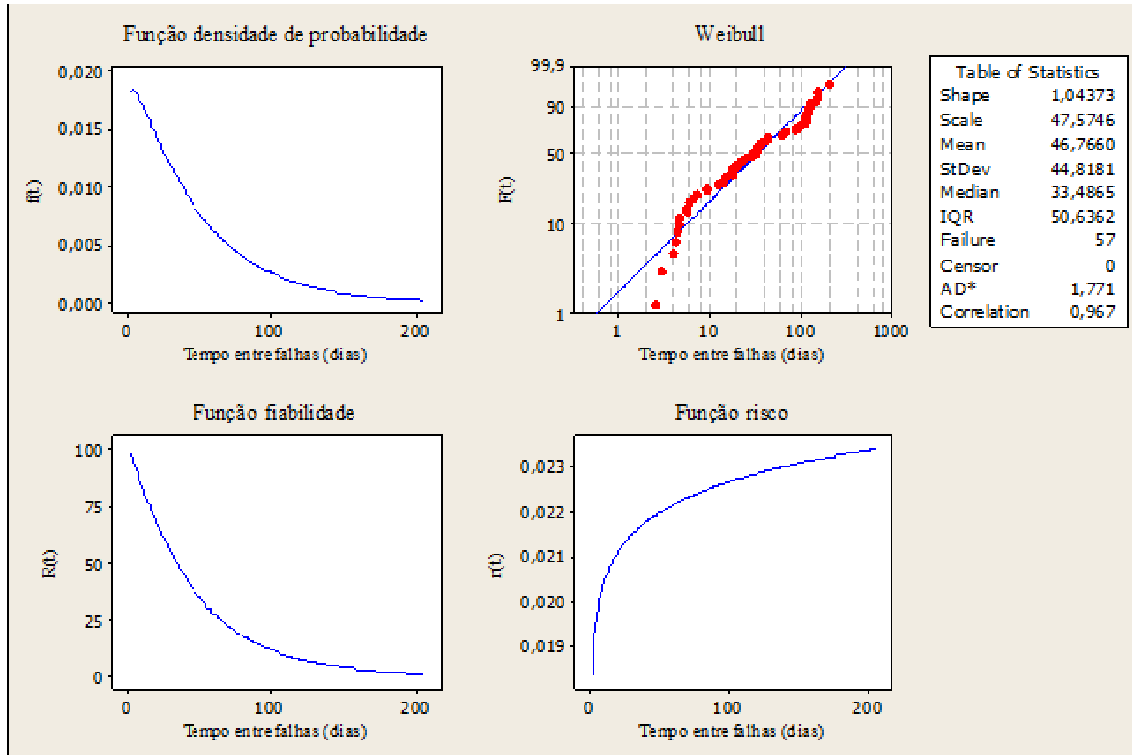


Figura 6.8 Gráficos de Weibull dos valores da tabela do Anexo H relativos ao estado E9

Pelos valores obtidos na Figura 6.8 e também a partir dos parâmetros da distribuição de Weibull e das funções matemáticas apresentadas na Secção 2.7 obtêm-se as seguintes funções para o sistema de controlo de carga na(s) pá(s):

Função fiabilidade:
$$R_2(t) = e^{-\left(\frac{t}{47,575}\right)^{1,044}}$$

Função de risco:
$$r_2(t) = 0,019t^{0,044}$$

Função de risco acumulada:
$$H_2(t) = 0,018t^{1,044}$$

Função densidade de probabilidade:
$$f_2(t) = 0,019t^{0,044}e^{-\left(\frac{t}{47,575}\right)^{1,044}}$$

6.5.2 Análise do período ótimo de manutenção do sistema de controlo ativo de potência

Como já foi referido antes, o sistema de controlo de potência ativo é um sistema extremamente importante no aerogerador, pois visa a otimização do rendimento da máquina, mas, principalmente, pelo papel que assume em termos de segurança. Sabe-se que uma falha no sistema de controlo de carga na(s) pá(s) (estado E9 do aerogerador) influencia ativamente uma falha no sistema de controlo de potência ativo (estado E11). Estes dois estados têm sido, portanto, analisados com mais detalhe.

Nesta secção, pretende-se determinar, face ao que é considerado acerca de custos e da função de risco relativos a E11 e E9, qual o melhor instante para a realização da manutenção preventiva e, simultaneamente, ao fim de quantas manutenções preventivas dever-se-á substituir todo o sistema de controlo de potência ativo, conforme algoritmo apresentado na Secção 4.2.7.3 e função expressa na Eq. (4.35).

É de recordar que, no modelo descrito pela Eq. (4.35), $H_1(t)$ representa a função de risco acumulada do modo de falha tipo I, antes da primeira manutenção preventiva, que ocorre segundo um processo não homogéneo de Poisson. Do mesmo modo, $H_2(t)$ representa a função de risco acumulada do modo de falha tipo II, que ocorre também segundo um processo não homogéneo de Poisson.

Considere-se, no contexto desta aplicação, que:

$H_1(t)$ - função de risco acumulada do modo de falha tipo I, antes da primeira manutenção preventiva, isto é, função de risco acumulada de erro no controlo de potência ativo, ou seja, do estado E11, antes da primeira manutenção preventiva

$H_2(t)$ - função de risco acumulada do modo de falha tipo II, ou seja, função de risco acumulada de falha no controlo de carga da pá, isto é, estado E9

c_{m1} - custo (em €) de uma manutenção corretiva do modo de falha tipo I (inclui também o custo associado à indisponibilidade provocada)

c_{m2} - custo (em €) de uma manutenção corretiva do modo de falha tipo II (inclui também o custo associado à indisponibilidade provocada)

c_p -	custo (em €) de uma manutenção preventiva ao sistema de controlo ativo de potência
c_u -	custo (em €) de indisponibilidade devido a manutenção preventiva ao sistema de controlo ativo de potência
τ -	tempo (em dias) de indisponibilidade devido a manutenção preventiva ao sistema de controlo ativo de potência
c_r -	custo (em €) de uma substituição completa do sistema de controlo ativo de potência

A restante notação pode ser verificada na Secção 4.1, do Capítulo 4.

Importa ainda recordar que do total de ocorrências do modo de falha tipo I apenas 12,3% necessitam efetivamente de reparação, sendo que do total de ocorrências do modo de falha tipo II essa probabilidade é de 22,4%. Assim, o modelo descrito pela Eq. (4.35) deverá ser reajustado a esta realidade e, por isso, deverá ser reescrito como:

$$C(T, N) = \frac{c_1 \times 0.123 \times H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} + c_2 \times 0.224 \times H_2(NT) + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \quad (6.3)$$

Nas secções que se seguem é analisado o custo de manutenção obtido através da Eq. (6.3) em duas situações distintas: 1ª) todos os parâmetros são considerados rígidos e 2ª) os parâmetros são considerados rígidos e difusos.

Na Secção 6.5.2.1, que analisa a situação em que todos os parâmetros são considerados rígidos, analisa-se também a relação de dependência existente entre os estados E11 e E9.

Na Secção 6.5.2.2, que analisa a situação em que os parâmetros da Eq. (6.3) são considerados rígidos e difusos, são estudados dois casos distintos. O primeiro caso considera todos os parâmetros rígidos à excepção do custo de inspeção e manutenção preventiva, que é considerado difuso. O segundo caso estende o primeiro na medida em que considera como parâmetros difusos, além do custo de inspeção e manutenção

preventiva, o custo de indisponibilidade, o tempo de indisponibilidade, o custo de substituição e o factor de ajustamento.

6.5.2.1 Parâmetros rígidos

Suponha-se que existe conhecimento pleno acerca do comportamento do aerogerador e dos custos envolvidos em todo o processo de operação e manutenção, tomando por referência os valores dos custos calculados na Secção 6.4.2 e os valores dos parâmetros de fiabilidade determinados na Secção 6.5.1. Com esta base de conhecimento, considere-se, então, os valores rígidos para os parâmetros de *input* da Tabela 6.6.

Tabela 6.6 Estimativa de *inputs* para parâmetros rígidos

<i>Parâmetro</i>	<i>Estimativa</i>
$H_1(t)$	$0,041t^{1,019}$
$H_2(t)$	$0,018t^{1,044}$
c_{m1}	$2000+301=2301€$
c_{m2}	$50+552=602€$
c_p	580€
c_u	293€
c_r	30000€
τ	4 horas (1/6 dias)

- **E11 e E9 independentes**

Imagine-se, também, que os modos de falha I e II (estados E11 e E9, respetivamente) são independentes, isto é, que $a=1$. Dada a sofisticação dos sistemas de controlo, considere-se que a probabilidade de deteção de uma falha neste sistema é 1 ($p=1$).

Assim, a expressão definida na Eq. (6.3) pode ser reescrita mais simplesmente como:

$$C(T, N) = \frac{c_{m1} \times 0.123 \times H_1(T) \times N + c_{m2} \times 0.224 \times H_2(NT) + c_r + (N-1)c_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \quad (6.4)$$

Donde, para os valores apresentados na Tabela 6.6, o custo de manutenção definido na Eq. (6.4) vem conforme a Figura 6.9.

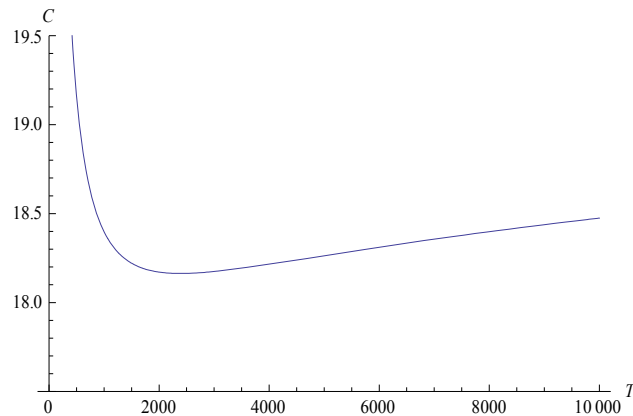


Figura 6.9 Gráfico da função custo de manutenção, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 independentes

Verifica-se, pela Figura 6.9, e aplicando o algoritmo proposto na Secção 4.2.7.3, que o custo mínimo diário (18.16€) é obtido para um período entre manutenções preventivas (T) de 2387 dias e para um número de manutenções preventivas antes da substituição total do sistema (N) de 156. Isto significa que o ciclo de funcionamento, se os modos de falha fossem independentes, seria aproximadamente 1020 anos. Este facto vem, de alguma forma, sugerir a dependência dos dois modos de falha.

- **E11 e E9 dependentes**

Tenta-se aqui analisar o processo de dependência dos modos de falha I e II do sistema de controlo ativo de potência. Especificamente, pretende-se conseguir uma aproximação para o fator de ajustamento $a > 1$, expresso na Eq. (6.3), que representa o efeito na ocorrência do modo de falha tipo I da ocorrência dos modos de falha tipo II.

Na Secção 6.5.1 é referido que em 2009 se registaram 162 ocorrências do modo de falha tipo I e 57 ocorrências do modo de falha tipo II. Os especialistas afirmam que aproximadamente 60% das ocorrências do modo de falha tipo II despoletam ocorrência do modo de falha tipo I, isto é, as 57 ocorrências observadas do modo de falha tipo II, provocaram aproximadamente 34 ocorrências do modo de falha tipo I. Isto significa que das 162 ocorrências observadas do modo de falha tipo I, 128 são falhas independentes e 34 dependem das falhas tipo II ocorridas.

Na Eq. (6.3), a expressão

$$H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} \quad (6.5)$$

representa o número de ocorrências tipo I por ciclo de funcionamento. Pela análise do ano de 2009, sabe-se que houve, no total, 162 ocorrências do modo de falha tipo I, das quais 34 foram desencadeadas pela ocorrência do modo de falha tipo II. Isto significa que, no ano de 2009, a expressão (6.5) toma a forma:

$$128e^{(a-1) \times 57} = 162 \quad (6.6)$$

A Eq. (6.6) permite obter uma estimativa para o fator de ajustamento, analisando os dados referentes ao ano 2009. Assim, $a \cong 1.004$.

Tome-se novamente os valores dos parâmetros estimados e apresentados na Tabela 6.5. Considere-se agora os modos de falha I e II (estados E11 e E9, respetivamente) dependentes, isto é, que $a > 1$. Especificamente, considere-se $a = 1.004$. Dada a sofisticação dos sistemas de controlo, mantém-se a probabilidade de deteção de falha, $p = 1$.

Verifica-se, pela Figura 6.10, e aplicando o algoritmo proposto na Secção 4.2.7.3, que o custo mínimo diário (37.3€) é obtido para um período entre manutenções preventivas (T) de 92 dias e para um número de manutenções preventivas antes da substituição total do sistema (N) de 98. O ciclo de funcionamento, se os modos de falha forem dependentes (com $a = 1.004$), é de aproximadamente 25 anos.

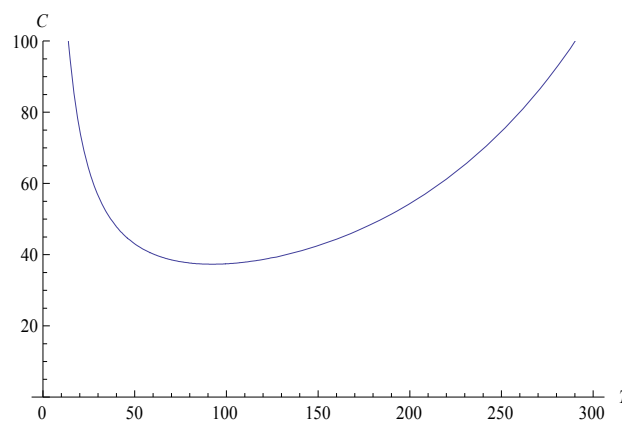


Figura 6.10 Gráfico da função custo, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 dependentes ($a = 1.004$)

Considerando a dependência dos dois modos de falha, a função custo definida na Eq. (6.3) manifesta-se bastante sensível a alterações no fator de ajustamento da dependência dos modos de falha, como evidencia a Figura 6.11.

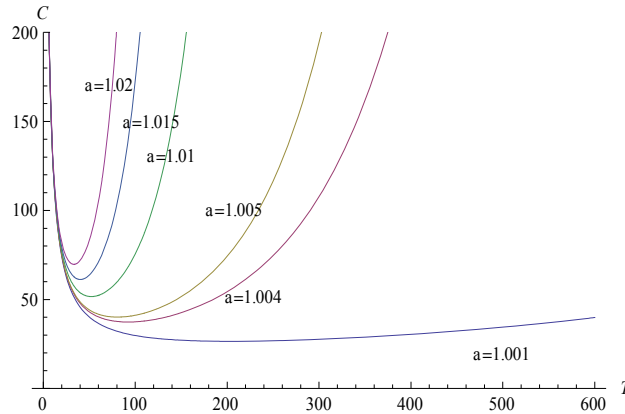


Figura 6.11 Gráfico das funções custo, para $N=98$, considerando os valores dos parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e os estados E11 e E9 independentes para diferentes valores de a

A Tabela 6.7 apresenta, para cada valor do parâmetro a assumido na Figura 6.11, uma estimativa para o custo mínimo diário (C^*), o tempo ótimo entre manutenções preventivas (T^*), o número ótimo de manutenções preventivas antes da substituição total do sistema (N^*) e para o ciclo de funcionamento (N^*T^*).

Tabela 6.7 Estimativa para *outputs* rígidos considerando os parâmetros rígidos da Tabela 6.6 e diferentes valores de a

a	N^*	$T^*(\text{dias})$	$T^*N^*(\text{anos})$	$C^*(\text{€})$
1.001	156	149.285	64	28.6987
1.004	98	92.2794	25	37.3364
1.005	82	91.9658	21	38.3617
1.01	54	82.8899	12	43.9123
1.015	43	77.2576	9	48.4103
1.02	44	63.1164	8	54.5889

A Tabela 6.7 sugere que à medida que aumenta o factor de ajustamento, e por conseguinte a dependência dos estados E11 e E9, aumenta também o custo mínimo diário e diminuem o tempo ótimo entre manutenções preventivas, o número ótimo de manutenções preventivas antes da substituição total do sistema e o ciclo de funcionamento.

6.5.2.2 Parâmetros rígidos e difusos

- **Caso 1**

Considere-se, agora, o caso concreto, real e frequente em tantas aplicações, isto é, que existe incerteza relativa a alguns custos e tempos envolvidos no processo de operação e manutenção do sistema de controlo de potência ativo. Admita-se que se pretende modelar essa incerteza por funções de pertinência difusas e incluí-la nos modelos de custos.

Especificamente, numa primeira análise, considerem-se todos os parâmetros rígidos apresentados na Tabela 6.6, à exceção do custo de inspeção e manutenção preventiva, c_p , que é assumido como sendo um número difuso triangular, conforme exposto na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 Estimativa para c_p difuso e restantes parâmetros rígidos

<i>Parâmetro</i>	<i>Estimativa</i>
$H_1(t)$	$0,041t^{1,019}$
$H_2(t)$	$0,018t^{1,044}$
c_{m1}	$2000+301=2301€$
c_{m2}	$50+552=602€$
c_p	$[580, 650, 800]$
c_u	$293€$
c_r	$30000€$
τ	$4 \text{ horas (1/6 dias)}$

Assim, a função custo definida pela Eq. (6.3) pode ser reescrita como:

$$\tilde{C}(T, N) = \frac{c_1 \times 0,123 \times H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(a-1)H_2(kT)} + c_2 \times 0,224 \times H_2(NT) + c_r + (N-1)\tilde{c}_p + Nc_u}{N(T + \tau)} \quad (6.7)$$

Por uma questão de simplicidade, denota-se o *input* difuso \tilde{c}_p apenas como c_p e os *outputs* difusos provenientes da aplicação da Eq. (6.7) apenas como T^* , T^*N^* e C^* , conforme constam na Tabela 6.9.

Efetivamente, de todos os parâmetros envolvidos no modelo, o custo de inspeção e manutenção preventiva é, talvez, o que menos se conhece. Esse serviço é feito pelo fabricante e não há qualquer orientação por parte deste relativamente ao seu custo. Falando especificamente do custo de inspeção e manutenção preventiva do sistema de controlo de potência ativo, apenas foi referido que o seu valor seria, no mínimo, 580€ por intervenção.

Para os valores dos parâmetros de *input* considerados na Tabela 6.6, e otimizando globalmente (em T e em N) a função expressa na Eq. (6.7), obtém-se, pelo princípio da extensão (descrito na Secção 5.3.1), os valores dos *outputs* da Tabela 6.9. Essa otimização foi feita pelo *software Mathematica*, utilizando o método *Differential Evolution*, já que é o que se apresenta mais robusto na existência de mínimos locais.

Tabela 6.9 Estimativa para *outputs* difusos considerando c_p difuso e restantes parâmetros rígidos

<i>Outputs</i>	<i>Estimativa</i>
N^*	98
T^* (dias)	[92.2794, 94.2446, 98.1918]
T^*N^* (anos)	[24.8, 25.3, 26.4]
C^* (€)	[37.3364, 38.078, 39.6181]

Dos *outputs* obtidos e apresentados na Tabela 6.9, a Figura 6.12 faz a representação gráfica do custo ótimo de manutenção diário (C^*) e do tempo ótimo entre inspeções e manutenções preventivas (T^*).

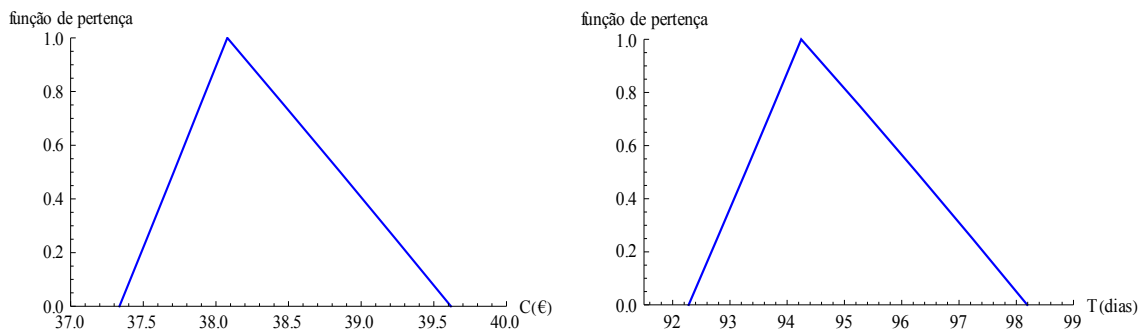


Figura 6.12 Outputs difusos, C e T , resultantes da aplicação da função custo da Eq. (6.7) admitindo os valores dos parâmetros da Tabela 6.8

Pela Eq. (5.18), e atendendo a que $\tau = 1/6$ dias e $T^* = [92.2794, 94.2446, 98.1918]$ (em dias), a disponibilidade vem dada por:

$$A_{inh} = [0.99819, 0.99823, 0.9983]$$

Considerando a informação contida na Tabela 6.8, o sistema de controlo de potência ativo tem uma disponibilidade mínima superior a 99,8%, qualquer que seja o valor do colapso de T^* assumido na prática.

- **Caso 2**

Sabe-se, no entanto, que o valor do custo de indisponibilidade, c_u , associado a uma ação de manutenção preventiva a um sistema de controlo de potência ativo, é também muito incerto. A Tabela 6.8 assume-o como 293€, considerando uma velocidade média do vento durante a ação de manutenção de 8m/s. Apesar de, muitas vezes, se aproveitar alturas de pouco vento para a realização de ações de manutenção preventiva, a verdade é que essas mesmas ações, sendo planeadas, acabam por ocorrer sem muita previsibilidade no que respeita à velocidade do vento nessas ocasiões, razão pela qual este parâmetro é considerado difuso na análise seguinte. Também o tempo de indisponibilidade devido a ações de manutenção preventiva ao sistema deve ser encarado como difuso, assumindo como tempo mínimo necessário 4 horas. Sabe-se que o custo de substituição de todo o sistema de controlo de potência ativo *ronda* os 30000€, pelo que também será considerado difuso. Pelos dados de 2009, obteve-se como estimativa para o fator de ajustamento $a=1.004$. Dada a incerteza própria da dependência dos modos de falha, a é considerado também um número triangular difuso.

Os valores dos parâmetros envolvidos no modelo (rígidos e difusos) são os constantes na Tabela 6.10 e foram referenciados pelos peritos dos parques eólicos consultados.

Tabela 6.10 Estimativa para a , τ , c_p , c_u e c_r difusos e restantes parâmetros rígidos

<i>Parâmetro</i>	<i>Estimativa</i>
$H_1(t)$	$0,041t^{1,019}$
$H_2(t)$	$0,018t^{1,044}$
a	[1.003, 1.004, 1.005]
c_{m1}	2000+301=2301€
c_{m2}	50+552=602€
c_p	[580, 650, 800]
c_u	[180, 293, 350]
c_r	[28000, 30000, 32000]
τ	[1/6, 1/4, 1/2]

Assim, a função custo definida pela Eq. (6.3) pode ser reescrita como:

$$\tilde{C}(T, N) = \frac{c_1 \times 0.123 \times H_1(T) \sum_{k=0}^{N-1} e^{(\tilde{a}-1)H_2(kT)} + c_2 \times 0,224 \times H_2(NT) + \tilde{c}_r + (N-1)\tilde{c}_p + N\tilde{c}_u}{N(T + \tilde{\tau})} \quad (6.8)$$

Os valores de *input* da Tabela 6.10, pelo princípio da extensão, otimizando globalmente a função expressa na Eq. (6.8), conduzem aos valores de *outputs* da Tabela 6.11.

Por uma questão de simplicidade, denotam-se os *inputs* difusos \tilde{a} , \tilde{c}_p , \tilde{c}_u , \tilde{c}_r e $\tilde{\tau}$ da Eq. (6.8) apenas como a , c_p , c_u , c_r e τ e os seus *outputs* difusos apenas como T^* , T^*N^* e C^* , conforme constam na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 Estimativa para *outputs* difusos considerando a , τ , c_p , c_u e c_r difusos e restantes parâmetros rígidos

<i>Outputs</i>	<i>Estimativa</i>
N^*	98
$T^*(\text{dias})$	[87.3053, 94.1565, 104.1]
$T^*N^*(\text{anos})$	[23.4, 25.3, 28]
$C^*(\text{€})$	[30.523, 34.6441, 39.0847]

Dos *outputs* obtidos e apresentados na Tabela 6.11, a Figura 6.13 faz a representação gráfica do custo ótimo de manutenção diário (C^*) e do tempo ótimo entre inspeções e manutenções preventivas (T^*).

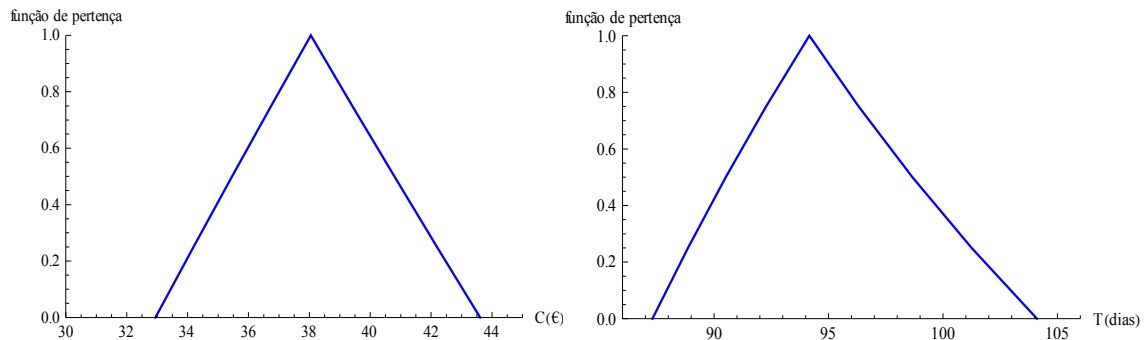


Figura 6.13 *Outputs* difusos, C e T , resultantes da aplicação da função custo expressa na Eq. (6.8), admitindo os valores dos parâmetros da Tabela 6.10

Analogamente ao que já foi realizado antes, pela Eq. (5.18), como $T^* = [87.3053, 94.1565, 104.1]$ e $\tau^* = [1/6, 1/4, 1/2]$, a disponibilidade é:

$$A_{inh} = [0.99433, 0.99731, 0.9984]$$

Conclui-se que, qualquer que seja o valor do colapso de T^* assumido na prática, a disponibilidade do sistema de controlo de potência ativo é sempre superior a 99,4%.

6.6 Considerações finais

O principal objetivo deste capítulo consistia na aplicação do modelo de manutenção de custos, desenvolvido no Capítulo 5, a um sistema, realizando a comparação entre os custos efetivos de manutenção deste sistema com aqueles que são obtidos através da aplicação do modelo.

O sistema analisado foi o sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador, no qual se reconhecem essencialmente dois modos de falha (dependentes).

A seleção deste sistema deveu-se fundamentalmente a três fatores:

- i) ser um sistema cujo comportamento é extremamente sujeito a incerteza, quer por estar sujeito a fatores externos (por exemplo, de natureza ambiental), quer pela pouca informação existente, quer pela dependência que tem de depósitos de

especialistas, motivo pelo qual a modelação difusa tem particular sentido e interesse;

ii) ser um sistema que revela falhas frequentes e com grande tempo de permanência em falha, comparativamente a outros sistemas do aerogerador;

iii) ser um sistema muito importante no que diz respeito à segurança do aerogerador.

A tarefa foi extremamente difícil. Apesar de o histórico de dados registar a data de todos os estados e a velocidade do vento nesses instantes, a restante e crucial informação relativa aos custos de manutenção provém somente de experiências e crenças de quem trabalha na área.

Contabilizou-se, com base em dois anos de estudo, o número de ocorrências de cada um dos estados e, destas, o número de vezes que a equipa de manutenção teve necessidade de intervir.

O que se revelou verdadeiramente complexo foi o processo de determinação dos custos envolvidos. O custo das manutenções corretivas foi estimado por peritos da empresa que gere o parque. Os custos de indisponibilidade foram determinados, sabendo a duração da paragem (ou de não funcionamento pleno), a velocidade média do vento durante essa paragem, deduzindo assim os custos da perda de produção de energia e consequente valor da não venda à rede elétrica.

Relativamente a manutenções preventivas, sabe-se que o fabricante faz quatro por ano. Estas manutenções são realizadas a todo o aerogerador e não, apenas, ao sistema de controlo de potência ativo. Consequentemente, mais tortuosa se tornou a procura desta informação. Assim, os custos das manutenções preventivas foram, também, estimados por peritos no setor, sendo certo que a melhor aproximação para os verdadeiros valores apenas o fabricante a poderia dar, o que se manifestou impossível, dada a confidencialidade que mantêm relativamente a essa informação. A empresa que forneceu a informação para este estudo tem, também, um contrato de confidencialidade com o fabricante, facto por que nunca foi revelada a identidade de ambos.

Neste contexto, foi estimado o custo de manutenção anual do sistema de controlo de potência ativo, até aqui desconhecida publicamente sequer uma aproximação.

De seguida, aplicou-se o modelo probabilístico-difuso (já que a maioria da informação era de natureza incerta) de manutenção, desenvolvido no Capítulo 5. A função de risco dos dois modos de falha foi modelada por uma distribuição de Weibull, tendo em conta o histórico das falhas. Os parâmetros dos custos, a maior parte deles baseados em opiniões de técnicos especialistas, foram considerados difusos. Pela observação do comportamento das ocorrências, foi estimado um valor para o fator de ajustamento e, uma vez mais, pela opinião de peritos, assumida a probabilidade de não deteção de um destes modos de falha insignificante.

O modelo foi aplicado e os resultados manifestaram-se bastante encorajadores quanto à sua eficiência. O custo total de manutenção diário é ligeiramente superior ao obtido pela leitura direta dos dois anos. Acredita-se que esta ligeira diferença se deve ao facto de o modelo incorporar nos custos totais de manutenção o custo da substituição completa do sistema. Além disso, o período entre manutenções preventivas ronda os 92 dias (o fabricante faz manutenções preventivas de 3 em 3 meses) e o ciclo de funcionamento os 25 anos (o contrato actual que a empresa tem com o fabricante é revisto ao fim de 20 anos).

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

Longe vai o tempo em que a manutenção era apenas levada a cabo na ocorrência de falhas. Num mundo industrializado e cada vez mais competitivo, as exigências relativas a segurança, ambiente, fiabilidade e custos (reduzidos) dos bens são uma prioridade para qualquer empresa. Neste contexto, a manutenção preventiva assume um papel primordial. Neste trabalho foi feita uma sistematização dos modelos existentes na literatura, agrupando-os, quando possível, nas diversas políticas de manutenção conhecidas. A tarefa revelou-se complexa, já que os modelos de manutenção desenvolvidos mais recentemente compreendem combinações das diferentes políticas. No entanto, considerando a simplicidade de implementação, nota-se que a política de manutenção preventiva periódica continua a assumir uma grande importância em situações reais.

Da pesquisa bibliográfica efetuada, constata-se que os modelos de custos de manutenção preventiva criados lidam, na maior parte dos casos, com simplificações matemáticas que, na prática, se traduzem em “descomplicações” completamente descontextualizadas da realidade, como sejam tempos de manutenção negligenciáveis, independência dos modos de falha, manutenções sempre perfeitas ou falhas sempre reveladas no instante da sua ocorrência. Poucos são os modelos, também, que tratam a incerteza dos parâmetros envolvidos. Como é reconhecido, a incerteza existe numa perspectiva industrial real e não a contemplar na construção de modelos de manutenção pode conduzir a conclusões incorretas e, conseqüentemente, a erros na tomada de decisão.

Nesta tese dá-se um contributo importante no sentido de colmatar tais lacunas em termos de desenvolvimento matemático. Para o efeito, foi desenvolvido um modelo complexo de manutenção preventiva imperfeita que lida com custos de não deteção de avarias, tempos de indisponibilidade, dependência dos modos de falha e a incerteza inerente aos parâmetros, variáveis que, em simultâneo, são negligenciadas em outros estudos.

Em situações reais, muitas informações essenciais só são conhecidas *a priori* de forma qualitativa, sendo expressas pelos especialistas. Do mesmo modo, medidas de

desempenho só estão disponíveis em termos linguísticos (bom, muito, grande). Mesmo quando são avançados dados quantitativos, estes são frequentemente referidos de um modo vago e impreciso (por exemplo, “o custo da reparação *ronda* 2000€”). Este panorama conduz inevitavelmente a um cenário de incerteza (não probabilística), que dificulta o uso da Teoria das Probabilidades. Este tipo de incerteza foi representada neste trabalho recorrendo à Teoria dos Conjuntos Difusos.

Do modelo probabilístico-difuso desenvolvido derivam os instantes ótimos de manutenção, bem como o número de manutenções preventivas que devem ser realizadas até à substituição do sistema, sempre numa perspetiva de minimização do custo total de manutenção.

O modelo foi aplicado a um sistema tecnologicamente sofisticado, especificamente ao sistema de controlo ativo de potência de um aerogerador, tendo sido obtidos resultados que atestam a aplicabilidade do modelo.

A principal limitação a assinalar prende-se com a questão da otimização global dos dois *outputs*, isto é, os instantes de manutenção e o número de manutenções ótimas antes da substituição. O algoritmo abordado no Capítulo 4 não garante esse mínimo global e o algoritmo utilizado pelo *software Mathematica* parece dar apenas uma boa aproximação desse mínimo global, dada a existência de muitos mínimos locais.

Num futuro próximo, pretende-se desenvolver ferramentas algorítmicas mais precisas no que respeita à otimização simultânea dos instantes de manutenção e do número de manutenções antes da substituição completa do sistema.

Os modelos propostos nos Capítulos 4 e 5 deverão ser aplicados a outros sistemas tecnológicos, mesmo que, para o efeito, o modelo tenha que sofrer algumas adaptações ao sistema em análise. A exaustiva comparação dos custos atuais de manutenção e os custos conseguidos depois da aplicação dos modelos deverá ser realizada, avaliando os potenciais ganhos.

Embora os modelos desenvolvidos tivessem sido, no Capítulo 6, aplicados ao sistema de controlo de potência ativo de um aerogerador, este revela-se, ainda, um promissor objeto de investigação em manutenção, havendo inúmeros subsistemas que poderão ser

pormenorizadamente estudados, aplicando os modelos propostos e desenvolvendo adaptações que mais se adequem aos subsistemas constituintes do aerogerador.

Referências

- Al-Najjar, B. e Alsayouf, I. (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *International Journal of Production Economics*. **84**: 85-100.
- APREN – Associação de energias renováveis (disponível em <http://www.apren.pt/gca/?id=47>, em 16 de março de 2012).
- Badía; F.G., Berrade, M.D. e Campos, Clemente A. (2002). Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. *Reliability Engineering & System Safety*. **78**: 157-163.
- Badía, F.G. e Berrade, M.D. (2009a). Opportunity-based age replacement for a system under two types of failures. *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications – Martorell et al. (eds). Taylor & Francis Group*. London; 575-580.
- Badía; F.G. e Berrade, M.D. (2009b). *Optimum Maintenance Policy of a Periodically Inspected System under Imperfect Repair*. doi: 10.1155/2009/691203.
- Barlow, R.E. e Hunter, L.C. (1960). Optimum preventive maintenance policies. *Operations Research*. **8**: 90-100.
- Barrico, C. (2009). *Optimização Evolucionária Multi-Objectivo em Ambientes Incertos – Pesquisa de Soluções Robustas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrotécnica, Especialidade de Informática, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Barros, A., Berenguer, C. e Grall, A. (2006). A maintenance policy for two-unit parallel systems based on imperfect monitoring information. *Reliability Engineering & System Safety*. **91**: 131-136.
- Bellman, R.E. e Zadeh, L.A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*. **17(4)**: 141-164.
- Belzunce, F., Ortega, E.-M. e Ruiz, J. M. (2006). Comparison of Expected Failure Times for Several Replacement Policies. *IEEE Transactions on Reliability*. **55(3)**: 490-495.

- Block, H.W., Borges, W.S. e Savits, T.H (1985). Age dependent minimal repair. *Journal of Applied Probability*. **22**: 370-385.
- Buckley, J.J. e Eslami, E. (2002). *An Introduction to Fuzzy Logic and Fuzzy Sets*. Physica-Verlag Heidelberg, New York.
- Cabral, J.P.S. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção – dos conceitos à prática*. LIDEL.
- Campbell, J.D. (1995). Outsourcing in maintenance management: a valid alternative to self position. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. **1**: 18-24.
- Castro, I.T. (2008). A model of imperfect maintenance with dependent failure modes. *European Journal of Operational Research*. **196**: 217-224.
- Castro, I.T., Huynh, K.T., Barros, A. e Bérenguer, C. (2010). Maintenance strategies in dynamic environments for repairable systems with minimal repairs dependent on their deterioration level. *Reliability, Risk and Safety – Ale, Papazoglou & Zio (eds). Taylor & Francis Group*. London; 1459-1465.
- Catálogo da AN Windenergie, Bonus-Alemanha
- Cheng, C-Y e Chen, M.C. (2003). The Periodic Preventive Maintenance Policy for Deteriorating Systems by Using Improvement Factor. *International Journal of Applied Science and Engineering*. **1(2)**: 114-122.
- Chiang, J.H. e Yuan, J. (2001). Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection. *Reliability Engineering & System Safety*. **71**: 165-172.
- Chien, Y.H. (2008). A general age-replacement model with minimal repair under renewing free-replacement warranty. *European Journal of Operational Research*. **186**: 1046-1058.
- Dahal, K.P., Aldrige, C.J. e McDonald, J.R. (1999). Generator maintenance scheduling using genetic algorithm with a fuzzy evaluation function. *Fuzzy Sets and Systems*. **102**: 21-29.
- Dieulle, L., Bérenguer, C., Grall, A. e Roussignol, M. (2003). Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system. *European Journal of Operational Research*. **150**: 451-461.

- Dong, W. e Shah, H.C. (1987). Vertex Method for Computing Functions of Fuzzy Variables. *Fuzzy Sets and Systems*. **24(1)**: 65-78.
- Ebeling, C.E. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw-Hill.
- Ekel, P., Pedrycz, W. e Schinzinger, R. (1998). A general approach to solving a wide class of fuzzy optimization problems. *Fuzzy Sets and Systems*. **97**: 49-66.
- Enea, M., Galante, G. e Panascia, E. (2005). The facility layout problem approached using a fuzzy model and a genetic search. *Journal of Intelligent Manufacturing*. **16**: 303-316
- Garg, A. e Deshmukh, S.G. (2006). Maintenance management: literature review and directions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. **12(3)**: 205-238.
- Gertsbakh, I. (2000). *Reliability Theory – With Applications to Preventive Maintenance*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Goumas, M. e Lygerou, V. (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. *European Journal of Operational Research*. **123**: 606-613.
- Grall, A., Bérenguer, C. e Dieulle, L. (2002). A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety*. **76**: 167-180.
- Grandell, J. (1976). *Doubly Stochastic Poisson Processes*. London: Springer-Verlag.
- Guerra, F. (1977). *Iniciação à Fiabilidade Industrial*. Lopes da Silva.
- Herrera, F., Lozano, M. e Verdegay, J.L. (1994). Applying Genetic Algorithms in Fuzzy Optimization Problems. *Fuzzy Systems & A.I. Reports and Letters*. **3(1)**: 39-52.
- Hong, D.H. (2006). Renewal process with T-related fuzzy inter-arrival times and fuzzy rewards. *Information Sciences*. **176**: 2386-2395.
- Huynh, K.T., Barros, A., Bérenguer, C. e Castro, I.T. (2011). A periodic inspection and replacement policy for systems subject to competing failure modes due to degradation and traumatic events. *Reliability Engineering & System Safety*. **96**: 497-508.

INEGI – Parques Eólicos em Portugal – dezembro de 2010 (disponível em http://www.inegi.up.pt/publicacoes/outras/Parques_Eolicos_Dez10_rev.pdf, em 16 de março de 2012).

Ivezic, D., Tanasijevic, M. e Ignjatovic, D. (2008). Fuzzy Approach to Dependability Performance Evaluation. *Quality and Reliability Engineering International*. **24**: 779-792.

Jhang, J. (2005). A study of the optimal use period and number of minimal repairs of a repairable product after the warranty expires. *International Journal of Systems Science*. **36**: 697-704.

Kahle, W. (2007). *Optimal maintenance policies in complete repair models*. Reliability Engineering & System Safety. doi: 10.1016/j.ress.2006.05.004.

Kaio, N., Dohi, T. e Osaki, S. (2002). *Classical Maintenance Models*. Stochastic Models in Reliability and Maintenance; 65-87. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Kallen, M. e Noortwijk, J. (2006) Optimal periodic inspection of a deterioration process with sequential condition states. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. **83**: 249-255.

Kaplan, R.S. e Norton, D.P. (1996). Using the balanced scorecard as a strategic management system. *Harvard Business Review*. **74(1)**:75.

Khanlari, A., Mohammadi, K. e Sohrabi, B. (2008). Prioritizing equipments for preventive maintenance activities using fuzzy rules. *Computers & Industrial Engineering*. **54**: 169-184.

Kijima, M., Morimura, H. e Suzuki, Y. (1988). Periodical replacement problema without assuming minimal repair. *European Journal of Operational Research*. **37(2)**: 194-203.

Kijima, M. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*. **26**: 89-102.

Kijima, M (2002). *Generalized Renewal Processes and General Repair Models*. Stochastic Models in Reliability and Maintenance; 65-87. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- Klir, George J. e Yuan, B. (1995). *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
- Labib, A.W., Williams, G.B. e O'Connor, R.F. (1998). An intelligent maintenance model (system): an application of analytic hierarchy process and fuzzy logic rule-based controller. *Journal of the Operational Research Society*. **49**: 745-757.
- Lagounne, R., Chateauneuf, A. e Aissani, D. (2010). Preventive maintenance scheduling for a multi-component system with non-negligible replacement times. *International Journal of Systems Science*. **41(7)**: 747-761.
- Lai, M-T. e Chen, Y-C. (2006). Optimal periodic replacement policy for a two-unit system with failure rate interaction. *International Journal of Advanced manufacturing Technology*. **29**: 367-371.
- Lai M-T. (2007) Periodical Replacement Model for a Multi-Unit System Subject to Failure rate Interaction. *Quality & Quantity*. **41**: 401-411.
- Lai, M-T. (2009). A discrete replacement model for a two-unit parallel system subject to failure interaction. *Quality & Quantity*. **43**: 471-479.
- Li, X., Zuo, M.J. e Yam, R.C.M. (2006). Reliability analysis of a repairable k-out-of-n system with some components being suspended when the system is down. *Reliability Engineering & System Safety*. **91**: 305-310.
- Li, Y.P., Huang, G.H., Yang, Z.F. e Nie, S.L. (2008). IFMP: Interval-fuzzy multistage programming for water resources management under uncertainty. *Resources Conservation & Recycling*. **52**: 800-812.
- Lin, D., Zuo, M.J. e Yam, R.C.M. (2001). Sequential Imperfect Preventive Maintenance Models with Two Categories of Failure Modes. *Naval Research Logistics*. **48**: 172-183.
- Liu, B. (2002). *Theory and practice of uncertain programming*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Locks, Mitchell O. (1995). *Reliability, Maintainability, and Availability Assessment*. ASQC.

- Lopes, I. (2007). *Política de Manutenção para um Conjunto de Equipamentos Activos Idênticos*. Tese de Doutoramento em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Minho.
- Lu, K.-Y. e Sy, C.-C. (2009). A real-time decision-making of maintenance using fuzzy agent. *Expert Systems with Applications*. **36**: 2691-2698.
- Lutigheid, D., Jardine, A.K.S. e Jiang, X. (2007). Optimizing the Performance of a Repairable System under a Maintenance and Repair Contract. *Quality and Reliability Engineering International*. **23**: 943-960.
- Malik, M.A.K. (1979). Reliable preventive maintenance policy. *AIIE Transactions*. **11(3)**: 221-228
- Meeker, W. e Escobar, L. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, Inc.
- Miranda, V. (1998). *A Fuzzy Perspective of Power System Reliability*. Electric Power Applications of Fuzzy Systems. M. E. El.Hawary, IEEE Press: 223-279
- Moghaddam, Kamran S. e Usher, John S. (2010). Optimal preventive maintenance and replacement schedules with variable improvement factor. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. **16(3)**: 271-287.
- Nakagawa, T. (1979). Optimal policies when preventive maintenance is imperfect. *IEEE Transactions on Reliability*. **28**: 331-332.
- Nakagawa, T. (1986). Periodical and sequential preventive maintenance policies. *Journal of Applied Probability*. **23**: 536-542.
- Nakagawa, T. (1988). Sequential Imperfect Preventive Maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*. **37(3)**: 295-298.
- Nakagawa, T. (2002). *Imperfect Preventive Maintenance Models*. Stochastic Models in Reliability and Maintenance – Shunji Osaki (ed). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg; 65-87.
- Nosoohi, I. e Hejazi, S.R. (2011). A multi-objective approach to simultaneous determination of spare part numbers and preventive replacement times. *Applied Mathematical Modelling*. **35**: 1157-1166.

- NF X60-010. (1994). *Maintenance – Concepts et definition des activités de maintenance*. AFNOR, premier tirage, Paris.
- NP EN 13306 (2007). Terminologia da manutenção, Instituto Português da Qualidade.
- Nunes, E. (2005). *Fiabilidade de Sistemas com Processos Não-Markovianos e com Parâmetros Incertos*. Tese de Doutoramento em Engenharia Electrónica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Oberkampff, W.L., Helton, J.C., Joslyn, C.A, Wojtkiewicz, S.F. e Ferson, S. (2004). Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters. *Reliability Engineering and System Safety*. **85**: 11-19.
- O'Connor, Patrick D.T. (1991). *Practical Reliability Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Oke, S.A. e Charles-Owaba, O.E. (2006). Application of fuzzy logic control model to Gantt charting preventive maintenance scheduling. *International Journal of Quality & Reliability Management*. **23**: 441-459.
- Pascual, R. e Ortega, J.H. (2006). Optimal replacement and overhaul decisions with imperfect maintenance and warranty contracts. *Reliability Engineering & System Safety*. **91**: 241-248.
- Pedrycz, W. e Gomide, F. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets*. Massachusetts Institute of Technology, London.
- Pham, H. e Wang, H. (1996). Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*. **94**: 425-438.
- Popova, E. e Wu, H.-C. (1999). Renewal reward processes with fuzzy rewards and their applications to T-age replacement policies. *European Journal of Operational Research*. **117**: 606-617.
- Ross, T. J. (1995). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw-Hill, Inc.
- Saade, J. J. (1996). A Unifying Approach to Defuzzification and Comparison of the Outputs of Fuzzy Controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. **4(3)**: 227-237.

- Sharma, R.K., Kumar, D. and Kumar, P. (2009). Fuzzy modelling of system behaviour for risk and reliability analysis. *International Journal of Systems Science*. **39(6)**: 563-581.
- Shen, Q., Zhao, R. e Tang, W. (2009). *Random fuzzy alternating renewal processes*. *Soft Computing*. **13**: 139-147.
- Sheu, S-H, Lin, Y-B e Liao, G-L (2006). Optimum policies for a system with general imperfect maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. **91**: 362-369.
- Slany, W. (1996). Scheduling as a fuzzy multiple criteria optimization problem. *Fuzzy Sets and Systems*. **78**: 197-222.
- Taghipour, S., Banjevic, D. e Jardine, A.K.S. (2010). Periodic inspection optimization model for a complex repairable system. *Reliability Engineering & System Safety*. **95**: 944-952.
- Taghipour, S. e Banjevic, D. (2011). Periodic Inspection Optimization Models for a Repairable System Subject to Hidden Failures. *IEEE Transaction on Reliability*. **60(1)**: 275-285.
- Tsai, Y.-T., Wang, K.-S. e Teng, H.-Y. (2001). Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*. **74**: 89-97.
- Vaurio, J. (1999). Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units. *Reliability Engineering and Systems Safety*. **63**: 133-140.
- Wang, H. e Pham, H. (1999). Some maintenance models and availability with imperfect maintenance in production systems. *Annals of Operations Research*. **91**: 305-318.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*. **139**: 469-489.
- Wang, H. e Pham, H. (2006). *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer-Verlag. London
- Wang, X. e Tang, W. (2009). Optimal production run length in deteriorating production processes with fuzzy elapsed time. *Computers & Industrial Engineering*. **56**: 1627-1632.

- Wolkenhauer, O. (2001). *Data Engineering: Fuzzy Mathematics in Systems Theory and Data Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Wu, J., Xie, M., Ng, T.S.A. (2011). On a general periodic preventive maintenance policy incorporating warranty contracts and system ageing losses. *International Journal of Productions Economics*. **129**: 102-110.
- Wu, S. e Clements-Croome, D. (2005). Optimal Maintenance Policies Under Different Operational Schedules. *IEEE Transactions on Reliability*. **54**: 338-346.
- Yuniarto, M.N. e Labib, A.W. (2006). Fuzzy adaptive preventive maintenance in a manufacturing control system: a step towards self-maintenance. *International Journal of Production Research*. **44(1)**: 159-180.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*. **8**: 338-353.
- Zadeh, L.A. (1978). Fuzzy Sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. **1**: 3-28.
- Zequeira, R. e Bérenguer, C. (2004). *Maintenance Cost Analysis of a Two-Component Parallel System with Failure Interaction*. Reliability and Maintainability Symposium; 220-225.
- Zequeira, R. e Bérenguer, C. (2005). Optimal inspection policies with predictive and preventive maintenance. *Engineering Optimization*. **37(5)**: 541-550.
- Zequeira, R.I. e Bérenguer, C. (2006). Periodic imperfect preventive maintenance with two categories of competing failure modes. *Reliability Engineering & System Safety*. **91**: 460-468.
- Zhang, Fan e Jardine, Andrew K.S. (1998). Optimal maintenance models with minimal repair, periodic overhaul and complete renewal. *IIE Transactions*. **30(12)**: 1109-1119.
- Zhao, R., Tang, W. e Yun, H. (2004). Fuzzy Renewal Process, Fuzzy Renewal Reward Process and Their Applications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 739-743.
- Zhao, R., Tang, W. e Wang, C. (2007). Fuzzy random renewal process and renewal reward process. *Fuzzy Optimization and Decision making*. **6**: 279-295.

Zimmermann, H.-J. (1997). *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*. International Series in Management Science/Operations Research. Kluwer Academic Publishers.

Zimmermann, H.-J. (1998). *Future research in five areas of fuzzy technology*. E.H. Ruspini, P.P. Bonissone and W. Pedrycz eds., *Handbook of Fuzzy Computation*, Institute of Physics Publishing, London.

Anexos

Anexo A – Fundamentos da teoria dos conjuntos difusos

Neste anexo são apresentados alguns conceitos relacionados com a Teoria dos Conjuntos Difusos que são fundamentais ao desenvolvimento do Capítulo 5. Apesar de ser uma teoria recente (os primeiros conceitos foram introduzidos na década de 60), a literatura é vasta nos últimos anos, muito embora não seja unânime a terminologia utilizada. Neste trabalho, utiliza-se essencialmente a terminologia adotada em Klir e Yuan (1995).

A.1 Introdução

A noção de conjunto difuso foi introduzida por Zadeh (1965) e, desde a sua apresentação inicial, a teoria dos conjuntos difusos tem sofrido um notável desenvolvimento, tanto do ponto de vista teórico como em aplicações, tendo sido aplicada com sucesso em muitas áreas, tais como classificação de padrões, controlo industrial, processamento de imagens, sistemas de informação ou instrumentação médica.

A motivação de Zadeh baseou-se no facto de, muito frequentemente, as classes de objetos existentes no mundo físico não apresentarem critérios de pertença definidos com precisão. Alguns exemplos deste tipo de classes de objetos são “temperaturas altas”, “pessoa baixa”, “trajeto longo” e mesmo conceitos como “floresta” ou “cidade”. Para este tipo de situações, a lógica clássica é demasiado rígida, não permitindo a existência de uma transição gradual entre pertença e não pertença. Neste sentido, a noção de pertença a um conjunto é apresentada não como uma questão de veracidade ou falsidade, mas como uma questão de grau. A Teoria dos Conjuntos Difusos foi então encarada como uma concorrente da Teoria das Probabilidades, no sentido de que desafia a lógica bivalente de Aristóteles, constituindo um novo modo de representar a incerteza. Se A é um conjunto difuso e x um elemento do conjunto universal, a proposição “ x pertence a A ” não é necessariamente ou verdadeira ou falsa, como imposto pela lógica bivalente. Pelo contrário, a proposição pode ser verdadeira apenas em determinado grau. É muito comum que os graus de pertença nos conjuntos difusos sejam expressos por valores do intervalo fechado $[0,1]$. Os valores extremos, 0 e 1, representam, respetivamente, a total negação e a total afirmação da pertença a um dado conjunto difuso, bem como a falsidade ou veracidade da proposição associada.

A capacidade dos conjuntos difusos expressarem transições graduais de total pertença para não-pertença e vice-versa é de grande utilidade. Essa utilidade traduz-se na capacidade de representar numericamente conceitos vagos, expressos em linguagem corrente. Por exemplo, em diversas situações muitas informações essenciais só são conhecidas *a priori* de forma qualitativa. Do mesmo modo, critérios de desempenho só estão disponíveis em termos linguísticos (bom, muito, grande). Este panorama leva a

imprecisões e falta de exatidão que dificultam o uso da maioria das teorias utilizadas até agora. Estas teorias são desenvolvidas e aplicadas com sucesso apenas no caso de os problemas estarem muito bem postulados. No entanto, não são capazes de resolver problemas reais cuja modelação matemática é impraticável.

Pedrycz e Gomide (1998) referem, por isso, que os conjuntos difusos têm um papel dominante na construção de pontes entre os termos linguísticos e a sua representação numa função de pertença numérica. Este tipo de domínio de conhecimento encontra-se presente e aplicado em várias áreas. Referem, ainda, o verdadeiro desenvolvimento e progresso dos conjuntos difusos como uma ferramenta para este século, sendo fortemente impulsionado pelas suas aplicações no mundo real e pelas poderosas metodologias daí decorrentes.

A.2 Conjuntos difusos

A.2.1 Conceitos básicos

A noção de conjunto ocorre frequentemente sempre que há tentativa de organizar, resumir e generalizar conhecimento acerca da informação disponível. O agrupamento dos objetos numa coleção, cujos membros partilham todos duma mesma característica ou propriedade, implica naturalmente a noção de conjunto. Segundo Pedrycz e Gomide (1998), os conjuntos são usados muitas vezes e quase inconscientemente. Frequentemente se fala de um conjunto de números, de temperaturas altas, de computadores pessoais, entre tantas outras coisas.

Na teoria clássica de conjuntos, um elemento ou pertence ou não pertence a um dado conjunto. Dado um universo X e um elemento particular $x \in X$, o grau de pertença $\mu_A(x)$, sendo $A \subseteq X$, é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x \in A \\ 0 & , x \notin A \end{cases}$$

A função $\mu_A(x): X \rightarrow \{0,1\}$ é chamada *função característica*.

A teoria dos conjuntos difusos propõe uma caracterização mais ampla, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O

grau de pertença pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor 0 indica uma completa exclusão e o valor 1 representa uma pertença absoluta ao conjunto. Esta generalização aumenta o poder de expressão da função característica. Por exemplo, para se expressar a ideia de que *a velocidade do vento ronda 25m/s*, podem usar-se diferentes funções de pertença (Figura A.1), com o valor modal em 25, para sugerir a ideia de que quanto mais perto a velocidade está de 25, mais se identifica com o conceito representado.

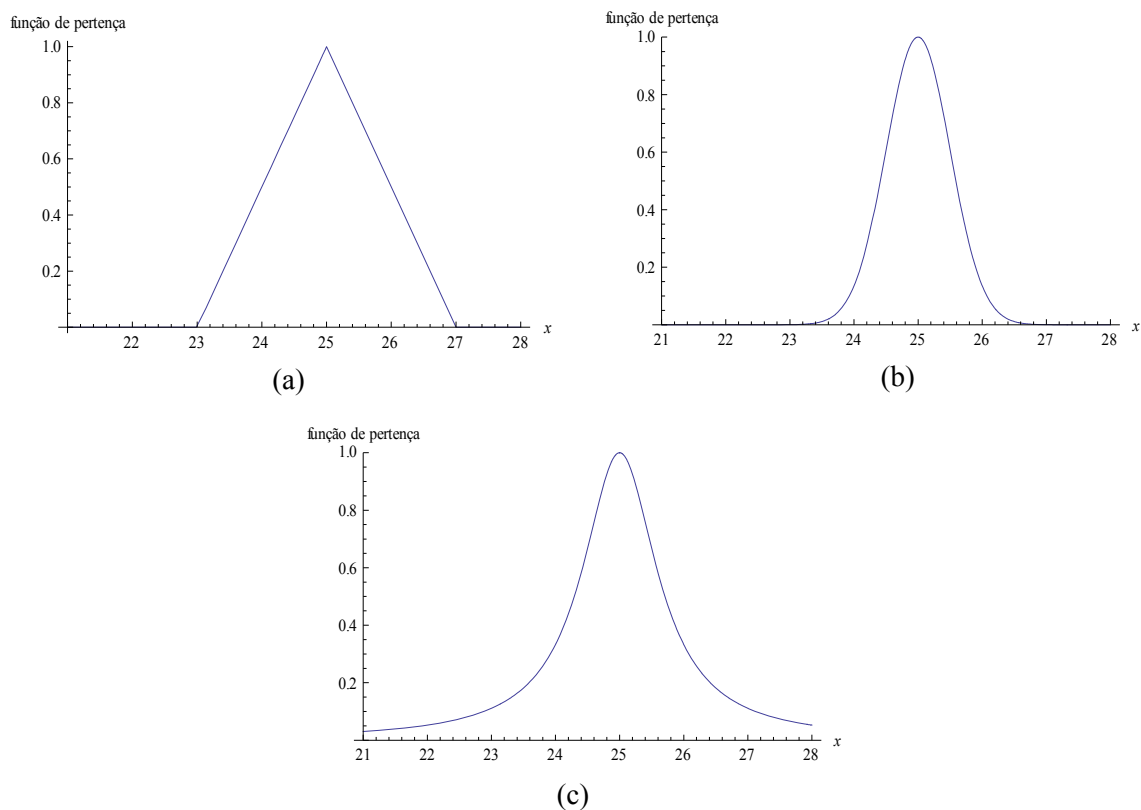


Figura A.1 Exemplos de uma funções de pertença ((a) triangular, (b) de Gauss e (c) exponencial) que podem ser usadas para caracterizar a proposição "velocidade do vento ronda 25m/s".

Um conjunto difuso \tilde{A} , no universo de discurso X , é definido por uma *função de pertença* de um elemento $x \in X$ ao conjunto \tilde{A} , $\mu_{\tilde{A}}(x)$, que permite associar a cada elemento do universo de discurso graus de pertença a \tilde{A} , sendo que estes graus de pertença assumem valores no intervalo $[0,1]$. O conjunto difuso \tilde{A} é, então, um conjunto de pares ordenados $(x, \mu_{\tilde{A}}(x))$.

A representação de um conjunto difuso em termos de uma função de pertença é normalmente designada por *representação vertical*.

Um dos conceitos mais importantes dos conjuntos difusos é o de *corte de nível alfa* (Klir e Yuan, 1995). Dado um conjunto difuso \tilde{A} , definido em X , e qualquer número $\alpha \in [0,1]$, o corte de nível alfa de \tilde{A} é o conjunto dos elementos que têm grau de pertença a \tilde{A} maior ou igual a α , isto é,

$$A^\alpha = \{x: \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\}.$$

Ou o conjunto $A^{\alpha+} = \{x: \mu_{\tilde{A}}(x) > \alpha\}$, se se referir ao *corte de nível alfa estrito*.

Um conjunto difuso também pode ser representado em termos dos seus cortes de níveis alfa. Esta representação é conhecida como a *representação horizontal* e corresponde aos conjuntos $\{A^\alpha: \alpha \in [0,1]\}$, ou seja, à família de todos os cortes de níveis alfa do conjunto difuso. A função de pertença de qualquer elemento x a \tilde{A} pode ser determinada a partir dos níveis alfa através de:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \sup \{\alpha \in [0,1]: x \in A^\alpha\}.$$

O conjunto de todos os níveis $\alpha \in [0,1]$, relativos aos cortes- α de um dado conjunto difuso \tilde{A} , é chamado conjunto nível de \tilde{A} e representa-se por:

$$\Lambda(\tilde{A}) = \{\alpha : \mu_{\tilde{A}}(x) = \alpha \text{ para } x \in X\}.$$

Propriedade A.1: Seja \tilde{A} um conjunto difuso e sejam $\alpha_1, \alpha_2 \in [0,1]$ tais que $\alpha_1 < \alpha_2$.

Então,

$$A^{\alpha_2} \subseteq A^{\alpha_1} \quad \text{e} \quad A^{\alpha_2+} \subseteq A^{\alpha_1+}$$

Propriedade A.2: Sejam \tilde{A} e \tilde{B} dois conjuntos difusos. \tilde{A} e \tilde{B} são iguais se e só se:

- i) $\mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x)$, para todo o x pertencente a X ; ou
- ii) $A^\alpha = B^\alpha$, para todo o $\alpha \in [0,1]$.

Propriedade A.3: Sejam \tilde{A} e \tilde{B} dois conjuntos difusos. O conjunto difuso \tilde{A} está contido no conjunto difuso \tilde{B} se e só se:

- i) $\mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x)$, para todo o x pertencente a X ; ou

ii) $A^\alpha \subseteq B^\alpha$, para todo o $\alpha \in [0,1]$.

O *suporte* de um conjunto difuso é o conjunto A^{0+} e corresponde ao conjunto de todos os elementos de X que têm grau de pertença a \tilde{A} positivo.

O *núcleo* de um conjunto difuso é o conjunto A^1 e corresponde ao conjunto de todos os elementos de X que têm uma pertença completa a \tilde{A} , isto é, que verificam $\mu_{\tilde{A}}(x)=1$.

Um conjunto difuso diz-se *normal* quando existe pelo menos um valor com pertença completa a \tilde{A} .

Um conjunto difuso diz-se *subnormal* quando nenhum valor tem pertença completa a \tilde{A} .

Um conjunto difuso diz-se *convexo* se os seus níveis alfa forem conjuntos convexos para todo o $\alpha \in (0,1]$.

A.2.2 Representação de conjuntos difusos

A principal função dos cortes de nível α (ou dos cortes de nível α estritos) de um conjunto difuso consiste na sua capacidade para representar conjuntos difusos. Cada conjunto difuso pode unicamente ser representado por uma família de todos os seus cortes α (ou por uma família dos cortes de nível α estritos) (Klir e Yuan, 1995).

A representação de um conjunto difuso pode, então, ser expressa em termos do seu suporte.

Para um universo de discurso discreto $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, um conjunto difuso \tilde{A} pode ser representado usando o conceito de pares ordenados e escrito como:

$$\tilde{A} = \{(x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), (x_2, \mu_{\tilde{A}}(x_2)), \dots, (x_n, \mu_{\tilde{A}}(x_n))\}$$

Usando o suporte de um conjunto difuso \tilde{A} , a representação de \tilde{A} pode ser simplificada como:

$$\tilde{A} = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \dots + \mu_n/x_n = \Sigma (\mu_i/x_i).$$

onde “+” indica a reunião dos elementos e μ_i o grau de pertença do elemento x_i , isto é, $\mu_i = \mu_{\tilde{A}}(x_i) > 0$. De notar, também, que as barras não são quocientes, mas apenas

delimitações. O “numerador” em cada termo é o grau de pertença, ao conjunto difuso \tilde{A} , associado ao elemento do universo de discurso indicado no “denominador”.

Se X é contínuo, a representação de \tilde{A} vem:

$$\tilde{A} = \int_x \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x}.$$

onde \int não representa um integral algébrico, mas antes indica a reunião dos elementos de \tilde{A} através de uma função teórica contínua. São estas, de resto, as mais utilizadas em aplicações reais.

Em princípio, qualquer função da forma $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1]$ descreve uma função de pertença associada a um conjunto difuso \tilde{A} . Tudo depende, no entanto, do conceito a ser representado e, também, do contexto no qual é usado. Os gráficos destas funções podem ter diferentes formas e propriedades específicas (por exemplo, a continuidade). Saber se uma forma particular é ou não adequada, apenas pode ser constatado no contexto da aplicação. Em alguns casos, o significado semântico captado pelos conjuntos difusos não se revela muito sensível a variações na forma e, nestas situações, funções simples são mais convenientes (Pedrycz e Gomide, 1998).

Em muitos exemplos práticos, os conjuntos difusos podem ser representados explicitamente por famílias de funções paramétricas. As mais comuns são apresentadas seguidamente (Pedrycz e Gomide, 1998):

a) Função triangular:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & , a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & , m < x \leq b \\ 0 & , x > b \end{cases}$$

onde m é o valor modal, e a e b denotam o limite inferior e superior, respetivamente, para os valores não nulos de $\mu_{\tilde{A}}(x)$. Por vezes, é mais conveniente usar uma notação que realce os parâmetros da função de pertença. Neste caso, viria:

$$\mu_{\tilde{A}}(x; a, m, b) = \max\{\min[(x-a)/(m-a), (b-x)/(b-m)], 0\}$$

b) Função Gamma:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ 1 - e^{-k(x-a)^2} & , x > a \end{cases} \quad \text{ou}$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & , x > a \end{cases} \quad , k > 0$$

c) Função S:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & , a < x \leq m \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & , m < x \leq b \\ 1 & , x > b \end{cases} \quad \text{onde } m = a + b/2$$

d) Função trapezoidal

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & , a < x \leq m \\ 1 & , m < x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n} & , n < x \leq b \\ 0 & , x > b \end{cases}$$

Ou, usando notação equivalente,

$$\mu_{\tilde{A}}(x; a, m, n, b) = \max\{\min[(x-a)/(m-a), 1, (b-x)/(b-n)], 0\}$$

e) Função de Gauss

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = e^{-k(x-m)^2}, \quad k > 0$$

f) Função tipo exponencial

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + k(x - m)^2}, \quad k > 1 \quad \text{ou}$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{k(x - m)^2}{1 + k(x - m)^2}, \quad k > 0$$

Como já foi referido, muitos conjuntos difusos representam conceitos linguísticos, tais como “baixo”, “médio”, “alto”, e são muitas vezes utilizados para definir estados de uma variável. Essa variável é frequentemente denominada por *variável difusa*. A título exemplificativo, a Figura A.2 caracteriza a temperatura (°C) no intervalo [0, 52] como uma variável difusa, comparando-a com uma variável não-difusa (tradicional). Os estados da variável difusa são conjuntos difusos representando cinco conceitos linguísticos: *muito baixa*, *baixa*, *média*, *alta*, *muito alta*. Todos os conjuntos encontram-se definidos por funções de pertença da forma

$$[0, 52] \rightarrow [0, 1].$$

Os gráficos destas funções têm a forma trapezoidal que, juntamente com as formas triangulares, são as mais simples e comuns nas aplicações correntes (Klir e Yuan, 1995).

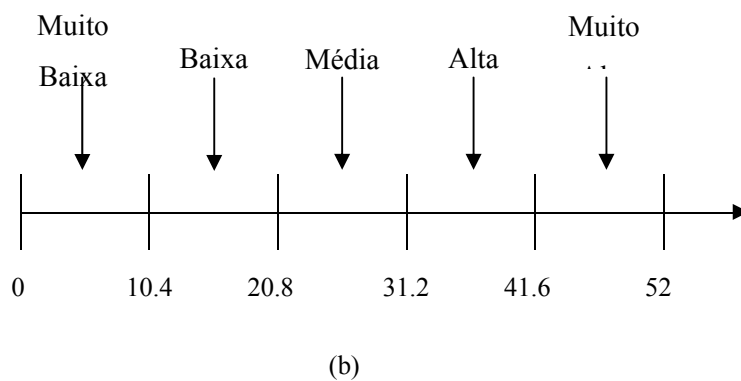
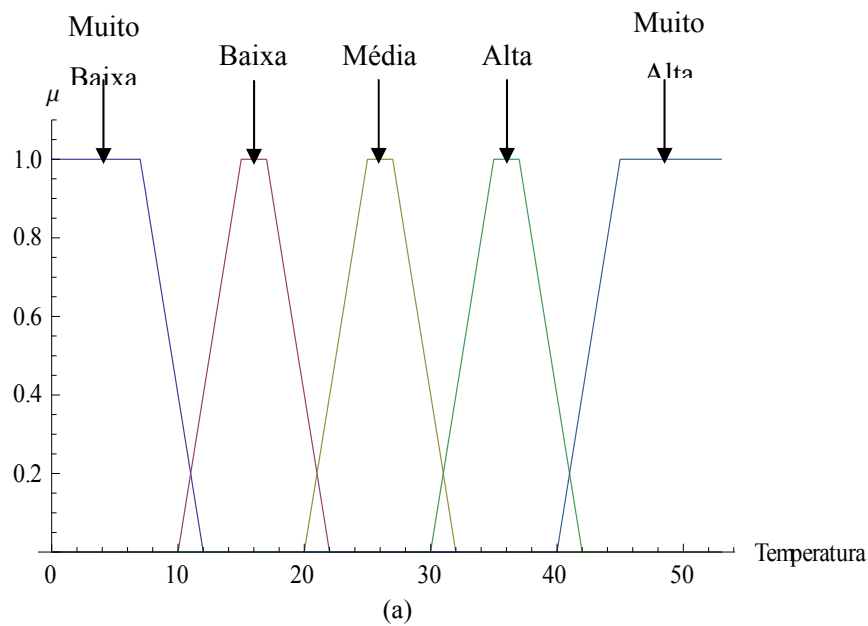


Figura A.2 Temperatura no intervalo $[0, 52]$ concebidas como: (a) uma variável difusa; (b) uma variável rígida

As variáveis difusas permitem uma transição gradual entre estados e, como tal, têm a capacidade de expressar e lidar, de um modo natural, com incertezas ao nível da observação e da medição. Pelo contrário, as variáveis não-difusas apresentam-se definidas por estados de conjuntos rígidos que, embora matematicamente corretos, não são realistas face a inevitáveis erros de medição, de observação e outros.

A.2.3 Operações com conjuntos difusos

As operações de complementaridade, interseção e reunião de conjuntos da Teoria clássica de conjuntos são aqui generalizadas para os conjuntos difusos. Segundo Klir e Yuan (1995), há várias formas de fazer essa generalização, sendo que as mais utilizadas são designadas como *operações difusas padrão*.

O *complementar padrão* \widetilde{A} de um conjunto difuso \widetilde{A} , em relação ao universo de discurso X , é um conjunto difuso que se obtém considerando

$$\mu_{\widetilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\widetilde{A}}(x), \quad \forall x \in X.$$

A *interseção padrão* de dois conjuntos difusos \widetilde{A} e \widetilde{B} é um conjunto difuso tal que

$$\mu_{\widetilde{A} \cap \widetilde{B}}(x) = \min[\mu_{\widetilde{A}}(x), \mu_{\widetilde{B}}(x)], \quad \forall x \in X.$$

A *reunião padrão* de dois conjuntos difusos \widetilde{A} e \widetilde{B} é um conjunto difuso tal que

$$\mu_{\widetilde{A} \cup \widetilde{B}}(x) = \max[\mu_{\widetilde{A}}(x), \mu_{\widetilde{B}}(x)], \quad \forall x \in X.$$

De ressaltar, no entanto, que ao aplicar as operações difusas padrão em conjuntos difusos, características como a normalidade e a convexidade podem ser perdidas. Outras generalizações destas operações podem ser encontradas em Klir e Yuan (1995), por exemplo.

A.2.4 Construção de conjuntos difusos

Os conceitos linguísticos são normalmente vagos e os seus significados dependem, quase invariavelmente, do contexto nos quais estão inseridos. Por exemplo, o conceito de *longa distância* tem diferentes significados no contexto de uma viagem a pé, de carro ou de avião. Esta dependência do contexto envolve não apenas os significados dos termos linguísticos, mas também os significados das operações nos termos linguísticos. É necessário determinar, em cada aplicação particular, quais das operações possíveis com conjuntos difusos melhor representam as operações desejadas nos correspondentes termos linguísticos. Muitos conexões de termos linguísticos, tais como *e*, *ou* e *se-então*, têm diferentes significados em diferentes contextos. É, então, importante determinar quais as operações em conjuntos difusos que melhor se aproximam do efeito desejado pelo uso das conexões utilizadas nos termos linguísticos.

Considerar a dependência dos termos linguísticos dos contextos de aplicação não é essencial para o desenvolvimento de recursos teóricos para representação dos conceitos.

No entanto, a identificação clara desse contexto manifesta-se um pré-requisito para a aplicação dos recursos encontrados em problemas reais.

A construção de uma função de pertença que expresse adequadamente os significados dos termos linguísticos utilizados numa situação particular, assim como a determinação dos significados das operações associadas a esses termos, não são, por si só, problemas da teoria dos conjuntos difusos (Klir e Yuan, 1995). A teoria dos conjuntos difusos possibilita a representação da informação adquirida relativa a determinado contexto. Assim, os conjuntos difusos são utilizados como aproximações dos significados dos termos linguísticos relevantes.

Muitos métodos de construção de funções de pertença têm sido descritos, sendo que quase todos têm como base a opinião dos especialistas do domínio de interesse. Fundamentalmente, estes métodos podem ser classificados como *métodos diretos* e *métodos indiretos*. Nos métodos diretos, os especialistas atribuem a cada elemento $x \in X$ um grau de pertença $\mu_{\tilde{A}}(x)$ que, de acordo com a sua opinião, é o que melhor exprime o significado do termo linguístico representado pelo conjunto difuso \tilde{A} . Nos métodos indiretos, em vez de ser pedido aos especialistas estimativas diretas para os graus de pertença, é-lhes solicitada a comparação entre pares de elementos x_1, x_2, \dots, x_n , de acordo com os pesos relativos de pertença a \tilde{A} .

A forma mais simples de obter a informação é, de facto, questionar diretamente pessoas entendidas no assunto acerca de valores de pertença. No entanto, as escalas desenvolvidas usando métodos diretos podem ser distorcidas pela inclusão de respostas tendenciosas. Os métodos indiretos, neste aspeto, mostram-se mais simples e robustos. Contudo, na maior parte dos casos, são necessárias muitas opiniões, uma vez que a opinião ordinal de, apenas, um especialista provém relativamente pouca informação (Zimmermann, 1997). Assim, os métodos direto e indireto podem, também, ser classificados de acordo com o número de especialistas envolvidos. Desta feita, resultam quatro principais classes de métodos para a construção de funções de pertença: métodos diretos com um especialista; métodos diretos com múltiplos especialistas; métodos indiretos com um especialista; e métodos indiretos com múltiplos especialistas.

A.2.4.1 Construções a partir de amostras de dados

Nesta secção pretende-se a construção de uma função de pertinência, partindo de amostras de graus de pertinência de alguns elementos de um dado universo de discurso X . Irá considerar-se o caso em que $X = \mathbb{R}$.

Considere-se a seguinte amostra

$$(x_1, a_1), (x_2, a_2), \dots, (x_n, a_n), \quad (\text{A.1})$$

onde $x_i \in X(\mathbb{R})$, para cada $i=1, \dots, n$, e a_i é um determinado grau de pertinência de x_i a um conjunto difuso \tilde{A} , ou seja, $a_i = \mu_{\tilde{A}}(x_i)$. O problema consiste em determinar a função de pertinência completa \tilde{A} . Pode-se, para o efeito, recorrer ao método da interpolação de Lagrange ou ao método dos mínimos quadrados.

Interpolação de Lagrange

O método da interpolação de Lagrange desenvolve uma função polinomial que exprime, de modo apropriado, a função de pertinência completa A . Essa função polinomial é dada, para todo $x \in \mathbb{R}$, por:

$$f(x) = a_1 L_1(x) + a_2 L_2(x) + \dots + a_n L_n(x)$$

onde

$$L_i(x) = \frac{(x - a_1) \dots (x - a_{i-1})(x - a_{i+1}) \dots (x - a_n)}{(x_i - a_1) \dots (x_i - a_{i-1})(x_i - a_{i+1}) \dots (x_i - a_n)}, \quad i=1, \dots, n$$

Se os valores $f(x)$ não estiverem no intervalo $[0, 1]$, para algum $x \in \mathbb{R}$, a função f não pode ser considerada como a função de pertinência \tilde{A} . Nesta situação, ter-se-á que converter f em \tilde{A} , para cada $x \in \mathbb{R}$, pela expressão:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \max[0, \min[1, f(x)]].$$

A grande vantagem deste método é que a função de pertinência corresponde exatamente aos dados da amostra. As desvantagens prendem-se não só com a complexidade das funções (expressa pelo grau do polinómio obtido), que aumenta com o número de amostras, mas também com o facto de o método não ter um bom desempenho quando

os valores de x são menores do que o menor valor do conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ou maiores do que o maior valor observado nesse mesmo conjunto.

Método dos Mínimos Quadrados

Considere-se a amostra de dados representada em (A.1) e, ainda, uma grupo de funções adequadamente parametrizadas $f(x; \alpha, \beta, \dots)$, onde α, β, \dots são parâmetros caracterizadores de cada função. O método dos mínimos quadrados seleciona uma função $f(x; \alpha_0, \beta_0, \dots)$ do grupo, para a qual

$$E = \sum_{i=1}^n [f(x_i; \alpha, \beta, \dots) - a_i]^2$$

atinge o seu mínimo. Então,

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \max[0, \min[1, f(x; \alpha_0, \beta_0, \dots)]]$$

para todo o $x \in \mathbb{R}$.

Este método pressupõe a escolha de uma classe de funções bem parametrizadas. Essa escolha pode refletir a opinião de especialistas ou, alternativamente, pode ser baseada em alguma teoria, experiência prévia ou, ainda, em comparação com outras classes.

Outros desenvolvimentos sobre atribuição de funções de pertença podem ser encontrados em Ross (1995).

A.2.5 Teoria das possibilidades

A teoria das possibilidades, introduzida por Zadeh (1978) como uma extensão dos conjuntos difusos e como uma teoria alternativa à teoria das probabilidades, é um modelo que alia um grande poder de expressividade com uma grande flexibilidade para o tratamento da informação incerta. Tecnicamente, uma distribuição de possibilidades é um conjunto difuso (Wolkenhauer, 2001) e todos os números difusos são distribuições de possibilidades. Neste modelo, a informação fornecida por uma fonte de conhecimento sobre o verdadeiro valor de uma variável x num universo X é codificado sob a forma de uma distribuição de possibilidades

$$\pi: X \rightarrow [0,1]$$

Para qualquer valor de $x_i \in X$, $\pi(x_i)$ reflete até que ponto é possível que $x = x_i$ (partindo do pressuposto que se tem somente um valor verdadeiro).

Uma distribuição de possibilidades π , relativa à variável x , pode, portanto, ser vista como a função de pertença a um conjunto difuso dos valores possíveis de x . Estes valores são supostamente mutuamente exclusivos, pois x toma somente um valor (seu valor verdadeiro), que pertence a um conjunto universal X dado. Normalmente, assume-se, também, que existe pelo menos um valor considerado como sendo completamente possível ser o verdadeiro valor de x . É importante notar que nada impede que valores distintos de X possam ser tidos como completamente possíveis simultaneamente (por exemplo, quando se representa π por um número difuso trapezoidal – Figura A.3 (b)).

Nesta teoria, a incerteza de um acontecimento A é representada por duas medidas: a medida de possibilidade, $\Pi(A)$, que representa o grau de possibilidade de ocorrência do acontecimento A ; e a medida de necessidade, $N(A)$, que representa o grau de impossibilidade de ocorrência do acontecimento contrário, sendo

$$N(A) = 1 - \Pi(\bar{A}).$$

Pode estabelecer-se uma relação entre a teoria das possibilidades e a teoria dos conjuntos difusos na medida em que se considera que o conjunto de valores que a variável x pode tomar é representado por um conjunto difuso \tilde{A} .

A.2.6 Lógica difusa

A Lógica Difusa é a lógica baseada na teoria dos conjuntos difusos. Difere da lógica Booleana na medida em que, por exemplo, o valor de uma proposição pode ser um conjunto difuso. Pelo contrário, nos sistemas lógicos binários, o valor da proposição ou é verdadeiro (1) ou é falso (0). Na lógica clássica, os atributos são exatos (“par”, “maior do que”), enquanto que na lógica difusa são vagos (“novo”, “velho”). O modo de transformação mais utilizado na lógica clássica é a negação. Pelo contrário, na lógica difusa, são admitidas inúmeras formas de transformação (muito, mais ou menos), que se tornam indispensáveis na geração de conceitos linguísticos (muito novo, mais ou menos perto, etc.). Os quantificadores existenciais e universais são os únicos existentes na

lógica clássica. Para além destes, a lógica difusa admite uma grande variedade (muito, vários, poucos, frequentemente, em torno de 20, etc.). Desta forma, a lógica difusa constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelação e controlo de processos, permitindo a redução de complexidade no tratamento de informações qualitativas, tornando-se uma solução para problemas que, do ponto de vista clássico, são considerados intratáveis.

A.3 Números difusos

A.3.1 Conceitos e propriedades

Considerando os vários tipos de conjuntos difusos, aqueles que são definidos no conjunto dos números reais \mathbb{R} assumem particular importância. Estes conjuntos têm um significado quantitativo e podem, sob certas condições, ser encarados como números difusos. Por exemplo, quando intuitiva e linguisticamente apresentam números aproximados, tal como, na secção anterior, “a velocidade do vento ronda os 25m/s”. Tais conceções revelam-se essenciais na caracterização dos estados da variável difusa e, conseqüentemente, desempenham um papel determinante em muitas aplicações, tais como na tomada de decisão ou na otimização.

Um conjunto difuso \tilde{A} diz-se um *número difuso* se e só se satisfaz as seguintes condições:

- i. é normal;
- ii. A^α é um intervalo fechado para todo o $\alpha \in (0,1]$;
- iii. o seu suporte é limitado.

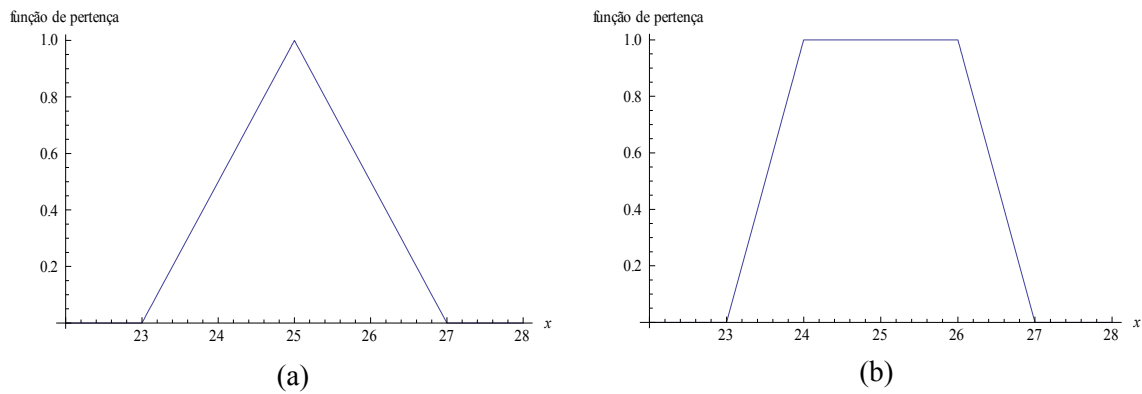


Figura A.3 Exemplos de números difusos expressando a proposição “a velocidade do vento ronda os 25m/s”. (a) número difuso triangular; (b) número difuso trapezoidal

Salienta-se que os números e os intervalos difusos são casos particulares das *quantidades difusas*. Esta designação dá-se a qualquer conjunto difuso normal definido na reta real \mathbb{R} .

Um número difuso triangular, \tilde{A} , pode ser definido por um terno $[a_1, a_2, a_3]$. O parâmetro central do terno, a_2 , é o valor modal e é-lhe atribuído o grau de pertinência máximo, isto é, $\mu_{\tilde{A}}(a_2) = 1$. Os parâmetros a_1 e a_3 representam os limites inferior e superior do conjunto de todos os elementos de X que têm grau de pertinência a \tilde{A} positivo. Tem-se que $\mu_{\tilde{A}}(a_1) = 0$ e $\mu_{\tilde{A}}(a_3) = 0$.

Um número difuso triangular pode considerar-se um caso particular de um número difuso trapezoidal definido por $[a_1, a_2, a_3, a_4]$, em que $a_2 = a_3$.

Em estudos de fiabilidade, os números triangulares e os números trapezoidais são os mais utilizados, devido, essencialmente, à sua simplicidade e ao facto de serem uma representação adequada para descrever imprecisão, incerteza e subjetividade dos dados relativos a falhas de equipamentos ou a falhas humanas (Nunes, 2005).

Um número difuso triangular \tilde{A} , definido como $[a_1, a_2, a_3]$, com cortes- α , A^α , representa-se por $A^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$, podendo ser estabelecidas as seguintes relações:

$$a_1^\alpha = (a_2 - a_1)\alpha + a_1$$

$$a_3^\alpha = a_3 - (a_3 - a_2)\alpha$$

O corte- α define um intervalo de confiança do número difuso triangular \tilde{A} que pode ser representado por:

$$A^\alpha = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, a_3 - (a_3 - a_2)\alpha]$$

É de notar, no entanto, que, neste contexto, a designação de *intervalo de confiança* não se relaciona com conceitos estatísticos clássicos. Neste caso, um intervalo de confiança α corresponde ao conjunto de corte de nível α definido em relação à função de pertença de um conjunto difuso. Se $\alpha=0$, o intervalo de confiança define a dispersão máxima da função de pertença ou o suporte do conjunto difuso.

A.3.2 Variáveis linguísticas

Os números difusos desempenham um papel fundamental na formulação de *variáveis quantitativas difusas*. Estas são variáveis cujos estados são números difusos. Quando, adicionalmente, os números difusos representam conceitos linguísticos, tais como “muito pequeno”, “pequeno”, “médio”, etc., interpretando um particular contexto, a variável resultante é vulgarmente designada por *variável linguística* (por exemplo, a “temperatura”, na Figura A.2, pode ser classificada como uma variável linguística).

A.3.3 Aritmética difusa

A noção de número difuso favoreceu o desenvolvimento de uma ferramenta, fundamental para muitas aplicações, designada por aritmética difusa. Esta aritmética consiste na execução de operações aritméticas com números difusos. Para efetuar estas operações pode recorrer-se a dois métodos: 1) o princípio da extensão e 2) cortes- α e aritmética intervalar. Estes dois métodos são indispensáveis para a propagação da incerteza dos parâmetros ou variáveis de *input* de um modelo ao seu *output*. O modelo consiste na expressão analítica pela qual os *inputs* rígidos se transformam num *output* rígido.

A.3.3.1 Princípio da extensão

O princípio da extensão desempenha um papel fundamental na transformação de um conjunto rígido num conjunto difuso. Essencialmente, o princípio constitui uma

metodologia geral para ampliar conceitos matemáticos determinísticos ao domínio dos conjuntos difusos.

Considere-se uma função $f: X \rightarrow Y$ tal que $f(x)=y$, para $x \in X$ e $y \in Y$. A extensão da função f à família de todos os subconjuntos de X e Y , denotados respetivamente por $P(X)$ e $P(Y)$, é também designada por f e é definida do seguinte modo:

$$f: P(X) \rightarrow P(Y)$$

$$A \rightarrow f(A) = \{y: y = f(x), x \in A\}$$

Pode, ainda, considerar-se a extensão de f aos subconjuntos difusos de X e Y . Esta extensão é uma ferramenta muito importante da teoria dos conjuntos difusos e é conhecida pelo princípio da extensão.

Seja \tilde{A} um conjunto difuso em X . O princípio da extensão diz que a imagem de \tilde{A} determinada pela aplicação $f: X \rightarrow Y$ é um conjunto difuso $\tilde{B} = f(\tilde{A})$ em Y , tal que o grau de pertença de cada valor $y \in Y$ a \tilde{B} é dado por:

$$\mu_{f(\tilde{A})}(y) = \mu_{\tilde{B}}(y) = \begin{cases} \sup_{x: y=f(x)} [\mu_{\tilde{A}}(x)] & , \text{ se existe } x : y = f(x) \\ 0 & , \text{ se não existe } x : y = f(x) \end{cases}$$

como se ilustra na Figura A.4.

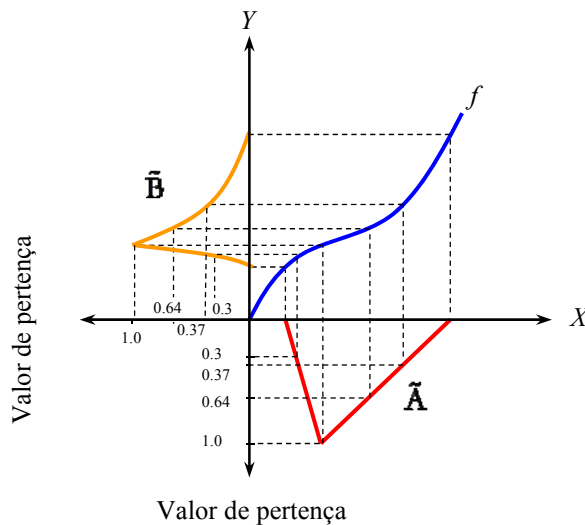


Figura A.4 Ilustração do princípio da extensão com f contínuo

O princípio da extensão também é válido quando a função f é definida num produto cartesiano, isto é, quando $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$. Neste caso, tem-se que:

$$f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \longrightarrow Y$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \longrightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y$$

Sendo x_1, x_2, \dots, x_n variáveis não interativas (conceito equivalente ao conceito de variáveis independentes na teoria das probabilidades, isto é, a atribuição de um valor a uma variável não tem impacto no valor atribuído a outra) e sendo $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$ conjuntos difusos de X_1, X_2, \dots, X_n , respetivamente, o princípio da extensão permite estabelecer o conjunto difuso $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n)$, no universo de discurso Y , do seguinte modo:

$$\tilde{B} = \{(y, \mu_{\tilde{B}}(y)) : y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X\}$$

O grau de pertença de cada valor $y \in Y$ a \tilde{B} é dado por:

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \begin{cases} \sup_{\substack{(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)}} \min[\mu_{\tilde{A}_1}(x_1), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x_n)] & \text{se existe } (x_1, \dots, x_n) : y = f(x_1, \dots, x_n) \\ 0 & \text{, se não existe } (x_1, \dots, x_n) : y = f(x_1, \dots, x_n) \end{cases}$$

A.3.3.2 Aritmética intervalar

A utilização da aritmética intervalar para efetuar operações aritméticas com números difusos assenta em duas propriedades dos números difusos:

- 1) Um conjunto difuso e, em consequência, um número difuso pode ser representado de forma única pelos seus níveis alfa;
- 2) Os cortes- α de um número difuso são intervalos fechados de números reais para todo o $\alpha \in (0, 1]$.

Esta última propriedade permite executar operações aritméticas com números difusos utilizando aritmética intervalar (isto é, operações aritméticas com intervalos fechados). Por outro lado, a primeira propriedade permite que as operações aritméticas com

números difusos possam ser feitas aplicando as correspondentes operações aritméticas intervalares a todos os cortes de nível alfa dos números difusos envolvidos.

As quatro operações aritméticas básicas com intervalos fechados são definidas da seguinte forma:

$$[a, b] + [c, d] = [a+c, b+d]$$

$$[a, b] - [c, d] = [a-d, b-c]$$

$$[a, b] \cdot [c, d] = [\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)]$$

$[a, b] / [c, d] = [a, b] \cdot [1/d, 1/c] = [\min(a/c, a/d, b/c, b/d), \max(a/c, a/d, b/c, b/d)]$, desde que $0 \notin [c, d]$.

A.3.3.3 Aritmética intervalar com cortes- α

Os cortes- α de números difusos são sempre intervalos fechados e limitados, para $\alpha \in (0, 1]$. Assim, sejam \tilde{A} e \tilde{B} dois números difusos e \otimes uma das quatro operações aritméticas básicas (adição, subtração, multiplicação e divisão). Então, o número difuso $\tilde{A} \otimes \tilde{B}$, com corte de nível alfa $(\tilde{A} \otimes \tilde{B})^\alpha$, é obtido considerando

$$(\tilde{A} \otimes \tilde{B})^\alpha = \tilde{A}^\alpha \otimes \tilde{B}^\alpha.$$

Isto significa que, considerando \tilde{A} e \tilde{B} dois números difusos tais que $\tilde{A}^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha]$ e $\tilde{B}^\alpha = [b_1^\alpha, b_3^\alpha]$, para $0 < \alpha \leq 1$, a aritmética dos números difusos deve ser definida em termos dos seus cortes- α do seguinte modo:

$$A^\alpha + B^\alpha = [a_1^\alpha + b_1^\alpha, a_3^\alpha + b_3^\alpha]$$

$$A^\alpha - B^\alpha = [a_1^\alpha - b_3^\alpha, a_3^\alpha - b_1^\alpha]$$

$$A^\alpha \cdot B^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha] \cdot [b_1^\alpha, b_3^\alpha]$$

$$A^\alpha / B^\alpha = [a_1^\alpha, a_3^\alpha] \cdot [1/b_3^\alpha, 1/b_1^\alpha], \text{ desde que } 0 \notin B^0.$$

Este método é bastante menos complexo do que o método que aplica o princípio da extensão (Secção A.3.3.1).

Note-se que se \tilde{A} e \tilde{B} são dois números difusos e \otimes uma das quatro operações aritméticas, o princípio da extensão permite estender as operações aritméticas com números reais às operações aritméticas com números difusos do seguinte modo:

$$(\tilde{A} \otimes \tilde{B})(z) = \sup_{z=x \otimes y} \min[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)], \text{ para todo o } z \in \mathbb{R}.$$

O método dos cortes- α e aritmética intervalar é, também, muito simples de implementar computacionalmente. Além disso, para números difusos contínuos, e utilizando as operações difusas padrão no procedimento descrito na Secção A.3.3.1, os dois métodos apresentam exatamente os mesmos resultados (Buckley e Eslami, 2002).

A.3.4 Colapso de resultados difusos

Existem muitas situações nas quais há a necessidade de converter o resultado difuso num número real (valor rígido). Por exemplo, se se pretender tomar uma decisão relativamente à voltagem de um motor elétrico, é impossível instruí-lo no sentido de “aumentar a voltagem *ligeiramente*”. Efetivamente, a máquina não compreende esta linguagem. Seria necessário especificar, por exemplo, “aumentar a voltagem para 3.4 volts”, isto é, para um valor rígido.

Assim, o colapso de resultados difusos ou a “defuzzificação” consiste na transformação de uma quantidade difusa numa quantidade precisa. Por sua vez, a “fuzzificação” consiste na conversão de quantidades precisas em quantidades difusas.

Na prática, e como normalmente é interpretado, o colapso de um *output* dado por um conjunto difuso consiste na determinação do valor rígido que, em sentido absoluto, é visto como o mais representativo do conjunto (Nunes, 2005).

Ross (1995) refere que existem na literatura, pelo menos, sete métodos propostos para o colapso de resultados difusos. Todos eles apresentam vantagens e desvantagens quando são aplicados a casos concretos (Nunes, 2005).

Apresentam-se, de seguida e de modo sumário, três desses métodos:

1. *Método do centro de gravidade*: este procedimento, não sendo de muito rápida determinação, é o mais versátil. É obtido através da seguinte expressão algébrica:

$$z^* = \frac{\int \mu_{\tilde{A}}(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_{\tilde{A}}(z) \, dz}.$$

2. *Método dos máximos das funções de pertinência*: este procedimento limita-se a destacar na função o valor modal do *output*:

$$\mu_{\tilde{A}}(z^*) \geq \mu_{\tilde{A}}(z).$$

3. *Método da média dos máximos das funções de pertinência*: este método está intimamente relacionado com o método anterior. Neste procedimento, no entanto, a localização dos máximos das funções de pertinência não é necessariamente única. Este método é dado pela seguinte expressão:

$$z^* = \frac{a+b}{2}$$

onde a e b são como definidos na Figura A.5 (c).

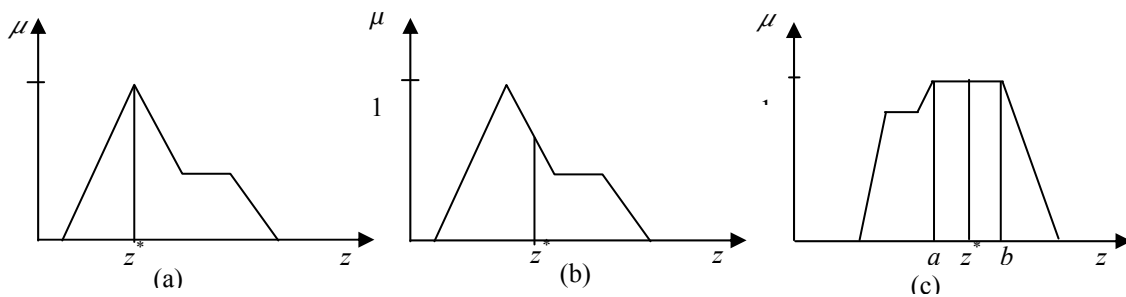


Figura A.5 Exemplos de “desfuzzificação”: (a) método dos máximos das funções de pertinência; (b) método do centro de gravidade; e (c) método da média dos máximos das funções de pertinência

Anexo B – A energia eólica em Portugal

O setor das energias renováveis, em particular, o setor da energia eólica é um setor de interesse para a expansão económica de um país e encontra-se ainda em expansão em Portugal. O presente anexo faz uma pequena contextualização da energia eólica em Portugal, apresentando as principais vantagens e desvantagens da sua exploração.

B.1 Energias renováveis

As energias renováveis surgem normalmente associada à produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, muito embora incluam outros fins, como por exemplo os transportes.

As fontes de energia renovável mais usadas são o sol, o vento, a chuva, as ondas do mar, o calor da terra e a biomassa e com a sua utilização torna-se possível gerar eletricidade de um modo sustentável e limpo.

Ao longo do tempo, as necessidades de energia das sociedades evoluíram de acordo com os diversos modelos de civilização.

O consumo de energia tem sido satisfeito usando processos que se baseiam, muitas vezes, na combustão de matérias-primas como o petróleo e o carvão e, mais recentemente, no gás natural e na energia nuclear.

As matérias-primas fósseis, apesar de existirem em quantidade ainda considerável, têm vindo a consumir-se rapidamente e são demasiado valiosas para serem utilizadas em processos de combustão para produção de energia elétrica. Estes combustíveis, ao serem queimados para fazer eletricidade ou usados nos transportes, produzem grandes quantidades de substâncias poluidoras, sendo responsáveis pelo chamado efeito estufa, que muitos estudos associam ao aumento da temperatura média do nosso Planeta.

Para ajudar a resolver esta situação, têm vindo a aplicar-se, com frequência crescente, a produção de eletricidade usando fontes renováveis. Estas podem, também, ser utilizadas para outros fins, tais como o aquecimento de água.

No que respeita aos transportes, têm vindo a ser desenvolvidos motores e combustíveis alternativos que substituem os derivados do petróleo, como é o caso do biodiesel. Mais recentemente, tem surgido a utilização do hidrogénio, mas este não é um combustível renovável, pois para o gerar é preciso usar energia, renovável ou não.

Tabela B.1 Fontes de energia renovável: vantagens e desvantagens

Fonte: APREN – Associação de energias renováveis

Fonte de energia	Vantagens	Desvantagens
Eólica	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Fonte de energia renovável abundante – Não existe emissão de poluentes – Tecnologia bastante desenvolvida e fiável 	<ul style="list-style-type: none"> – Poluição elétrica dificilmente previsível – Emissão de ruídos – Impacto visual
Hídrica	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Não existe emissão de poluentes – Responde rapidamente às necessidades de consumo – Permite o desenvolvimento turístico 	<ul style="list-style-type: none"> – Os ecossistemas são afetados durante a fase de construção – Produção elétrica dependente do índice de pluviosidade
Solar	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Não existe emissão de poluentes – Produção coincide com os períodos onde a procura é maior – A manutenção necessária das centrais é mínima – Fonte de energia renovável abundante 	<ul style="list-style-type: none"> – A construção das centrais é dispendiosa – A densidade energética é baixa, requerendo, por isso, grandes áreas – Não existe produção noturna
Biomassa	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Regularidade da produção e possibilidade de modulação (maior controlo na produção de eletricidade) – Possibilidade de gestão integrada da floresta (desde que seja assegurada de um modo sustentável) – Possibilidade de aproveitamento de resíduos industriais – Balanço de emissões de CO₂ é nulo 	<ul style="list-style-type: none"> – Menor poder calorífico comparativamente com combustíveis convencionais, sazonalidade – Necessita ser armazenada, tem complexas e onerosas operações de transporte e armazenamento da biomassa – Poderá colocar em risco a sustentabilidade do recurso a médio e longo prazo (colocando em risco os investimentos) – A pressão sobre o recurso poderá aumentar consideravelmente o seu custo, comprometendo a rentabilidade dos projetos – Custos de investimento por MW relativamente elevados – Maior probabilidade de emissão de partículas para a atmosfera
Biogás	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Redução das emissões de dióxido de carbono e metano para a atmosfera – Fonte de energia renovável abundante – Diminuição do volume de resíduos no final do processo – Os resíduos resultantes podem ser utilizados como fertilizantes 	<ul style="list-style-type: none"> – Custo de investimento inicial elevado – O processo obriga a uma monitorização e manutenção adequadas, exigindo custos extras – Libertação de gás sulfídrico, um gás tóxico
Geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Custos baixos comparativamente com combustíveis fósseis – Baixa emissão de dióxido de carbono e dióxido de enxofre 	<ul style="list-style-type: none"> – A energia geotérmica restringe-se a um número limitado de regiões – A energia tem que ser utilizada nas proximidades do campo geotérmico – Libertação de gases sulfurosos – Os resíduos líquidos podem contaminar as águas nas proximidades
Ondas e marés	<ul style="list-style-type: none"> – Redução da dependência energética – Fonte de energia renovável abundante – Não existe emissão de poluentes 	<ul style="list-style-type: none"> – Custo de investimento bastante elevado – Tecnologias ainda em fase de desenvolvimento – Impacto visual – Dificuldades associadas ao transporte de eletricidade para terra

B.2 Energia eólica

A energia eólica representa o aproveitamento da energia cinética contida no vento para produzir energia mecânica (rotação das pás), que pode, a seguir, ser transformada em energia elétrica por um gerador elétrico.

O vento é utilizado há milhares de anos para responder às necessidades energéticas da atividade humana, por exemplo para propulsar meios de transporte (barcos à vela), bombear água ou permitir o funcionamento de atividades industriais, como era o caso dos moinhos de vento ainda visíveis no cume de muitos montes portugueses.

Como a maior parte das fontes de energia renovável (exceto a geotérmica), a energia eólica é uma forma de energia solar: tem origem no aquecimento da atmosfera pelo sol, que põe em movimento as massas de ar. A rotação da terra, a forma e a cobertura da superfície terrestre e os planos de água influenciam a velocidade, a direção e a variabilidade do vento num determinado lugar.

Hoje em dia, a energia eólica é cada vez mais utilizada para produzir eletricidade, seja para utilização local descentralizada, como por exemplo em lugares isolados, seja em grandes parques eólicos constituídos por vários aerogeradores ligados à rede elétrica.

A Figura B.1 evidencia a capacidade geradora de base eólica na Europa, em dezembro de 2010.

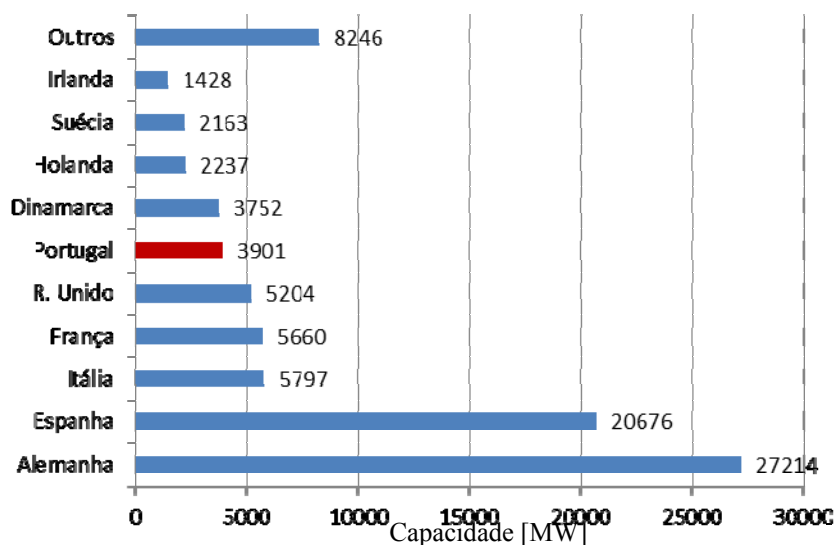


Figura B.1 Capacidade geradora de base eólica – Europa, dezembro 2010
 Fonte: INEGI – Parques Eólicos em Portugal – dezembro de 2010

A Tabela B.2 mostra a capacidade geradora de base eólica e o número de aerogeradores existentes em Portugal, em dezembro de 2010.

Tabela B.2 Capacidade geradora e número de aerogeradores em Portugal – dezembro 2010
Fonte: INEGI – Parques Eólicos em Portugal – dezembro de 2010

Parques eólicos em Portugal	Ligados		Em construção		Total	
	MW	Turbinas	MW	Turbinas	MW	Turbinas
Continente	3852,5	2027	435,3	216	4287,8	2243
Madeira	37,4	58	0,0	0	37,4	58
Açores	11,6	33	9,0	10	20,6	43
Total	3901,4	2118	444,3	226	4345,7	2344

B.2.1 Vantagens e desvantagens da energia eólica

A energia eólica tem incomparavelmente mais vantagens do que desvantagens. Por um lado, os aerogeradores modernos constituem modos eficientes de produção de eletricidade, convertendo com elevada eficiência um recurso totalmente renovável, o vento, em eletricidade de grande qualidade (modelos recentes de aerogeradores permitem ajustar muito precisamente as características da corrente e da tensão que são fornecidas às necessidades da rede elétrica). Além disso, a energia eólica produz eletricidade a um custo conhecido, que não depende das variações futuras do preço dos hidrocarbonetos. A energia eólica é, também, uma fonte de energia descentralizada que cria atividade económica e empregos em zonas rurais e em maior quantidade por MW, do que as formas mais centralizadas de produção de eletricidade. Por outro lado, tendo em conta fatores ambientais, o funcionamento de uma turbina eólica não produz nem emissões tóxicas ou poluentes, nem lixo e permite a continuação das atividades (nomeadamente agrícolas) no terreno envolvente. Mesmo considerando todo o ciclo de vida de uma central elétrica (construção, exploração, desmantelamento), a energia eólica é, de longe, a fonte com menor impacto ambiental, nomeadamente em termos de emissões de gases com efeito de estufa, responsáveis pelas alterações climáticas.

O maior inconveniente da energia eólica, tal como da energia solar, é óbvio e prende-se com a sua intermitência. O vento não sopra sempre à mesma velocidade e não sopra sempre quando a procura de eletricidade é maior. Este inconveniente mitiga-se, num sistema elétrico em que a energia eólica ocupa uma posição minoritária, utilizando

centrais flexíveis como as centrais a gás para compensar os momentos em que o recurso eólico é reduzido. No entanto, a energia eólica pode e deve – se se quiser reduzir significativamente as nossas emissões de CO₂ – ter uma participação considerável no sistema elétrico. Em Portugal, a produção de energia eólica foi multiplicada por 10 nos últimos 6 anos, e já atinge 10% do consumo nacional de eletricidade. Pode e vai aumentar ainda mais. Mas para assegurar a utilização otimizada do recurso eólico em grandes quantidades, três aspetos terão que ser considerados:

- i) Sistemas de gestão em tempo real dos parques eólicos para trabalhar eficazmente com outras fontes disponíveis;
- ii) Modelos de previsão ainda mais precisos e fiáveis, de modo a antecipar os regimes de ventos nas horas e nos dias seguintes;
- iii) Sistemas de armazenamento de energia, de modo a poder guardar o eventual excesso de energia eólica para usá-la mais tarde; no entanto, a energia elétrica não se pode armazenar como tal, e os sistemas químicos de armazenamento (baterias) são demasiado caros e volumosos como para servir à escala do sistema elétrico nacional. Atualmente, o melhor sistema de armazenamento a grande escala é a utilização das barragens reversíveis, que podem bombear água para cima quando, por exemplo, há muito vento, e depois aproveitar esta água nas suas próprias turbinas hidroelétricas para produzir eletricidade.

Anexo C – Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11

	<i>Estado E11 (falha no controle de potência ativo)</i>				
	Ocorrência n.º	Tempo indisponível	Velocidade média do vento (m/s)	Energia perdida (MW)	Custo Indisponibilidade (€)
MÁQUINA 1	1	1:08:26	18	2,34	210,43
	2	0:11:49	31	0,40	36,34
	3	0:12:26	27	0,42	38,23
	4	0:11:50	30	0,40	36,39
	5	0:03:48	23	0,13	11,68
	6	0:12:39	27	0,43	38,90
	7	10:27:15	17	21,43	1928,79
	8	9:50:07	24	20,16	1814,61
	9	0:12:01	14	0,41	36,95
	10	0:03:35	21	0,12	11,02
	11	0:03:30	20	0,12	10,76
	12	0:03:40	25	0,13	11,27
	13	0:03:42	17	0,13	11,38
	14	0:03:43	20	0,13	11,43
	15	0:06:09	21	0,21	18,91
	16	0:40:40	4	0,06	5,00
	17	0:26:35	2	0,00	0,12
	18	0:45:01	4	0,06	5,54
	19	0:15:25	3	0,01	0,58
	Total	25:02:21			4238,34
MÁQUINA 2	1	0:12:29	30	0,43	38,39
	2	0:16:11	38	0,55	49,76
	3	0:16:29	28	0,56	50,69
	4	0:03:32	18	0,12	10,86
	5	0:12:51	30	0,44	39,51
	6	13:27:48	9	15,89	1429,81
	7	4:01:10	7	2,14	192,45
	8	2:09:10	2	0,01	0,58
	9	0:41:50	3	0,02	1,57
	10	0:29:25	3	0,01	1,10
	11	0:44:51	4	0,06	5,52
	12	0:04:38	9	0,09	8,20
	13	0:30:51	11	0,97	87,46
	14	0:05:24	7	0,05	4,31
	15	0:25:03	6	0,13	12,06
	16	0:11:22	6	0,06	5,47
	17	0:07:33	7	0,07	6,02
	18	2:31:41	9	2,98	268,48
	19	3:38:33	8	2,97	267,18
	20	2:10:53	14	4,47	402,47
	21	7:18:09	9	8,62	775,53
	22	0:11:11	6	0,06	5,38
	23	0:07:06	9	0,14	12,57

	24	0:05:57	6	0,03	2,86
	Total	40:04:07			3678,24
MÁQUINA 3	1	33:53:08	7	18,03	1622,44
	2	0:11:47	29	0,40	36,23
	3	0:11:45	33	0,40	36,13
	4	0:12:35	35	0,43	38,69
	5	0:11:48	29	0,40	36,29
	6	0:12:18	32	0,42	37,82
	7	0:12:22	32	0,42	38,03
	8	64:49:58	11	122,53	11028,06
	9	0:12:04	32	0,41	37,11
	10	0:39:57	4	0,05	4,91
	11	0:35:51	10	0,96	86,69
	12	1:06:25	3	0,03	2,49
		Total	102:29:58		
MÁQUINA 4	1	0:13:24	25	0,46	41,20
	2	0:03:30	21	0,12	10,76
	3	0:11:51	26	0,40	36,44
	4	0:14:39	24	0,50	45,05
	5	0:13:58	21	0,48	42,95
	6	0:18:32	19	0,63	56,99
	7	13:09:40	7	7,00	630,15
	8	5:08:00	6	1,65	148,30
	9	0:40:22	3	0,02	1,51
	10	0:33:58	2	0,00	0,15
	11	0:47:36	4	0,07	5,85
	12	0:14:38	3	0,01	0,55
	13	2:31:42	8	2,06	185,45
	14	3:30:48	5	0,61	55,02
	15	2:08:15	14	4,38	394,37
	16	0:09:36	3	0,00	0,36
	Total	30:10:29			1655,12
MÁQUINA 5	1	0:12:24	27	0,42	38,13
	2	15:30:11	15	31,78	2860,31
	3	0:16:53	21	0,58	51,92
	4	0:18:28	22	0,63	56,79
	5	0:12:15	26	0,42	37,67
	6	45:16:36	9	53,43	4808,38
	7	1:43:53	6	0,56	50,02
	8	1:20:52	1	0,00	0,00
	9	0:44:42	3	0,02	1,68
	10	0:34:20	2	0,00	0,15
	11	0:48:30	2	0,00	0,22
	12	2:24:37	2	0,01	0,65
	13	0:49:07	8	0,67	60,05
	14	0:29:22	7	0,26	23,43
	15	0:09:38	3	0,00	0,36
	Total	70:51:48			7989,76
MÁQUINA 6	1	0:12:13	23	0,42	37,57
	2	68:36:00	10	110,58	9952,49
	3	19:01:14	8	15,50	1395,16
	4	51:16:52	2	0,15	13,85

Anexo C– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11

	5	1:39:49	7	0,89	79,65
	6	0:41:18	4	0,06	5,08
	7	0:28:16	3	0,01	1,06
	8	0:47:19	3	0,02	1,77
	9	0:53:34	11	1,69	151,86
	10	5:52:21	7	3,12	281,18
	11	0:09:56	2	0,00	0,04
	12	0:19:24	8	0,26	23,72
	13	0:03:32	16	0,12	10,86
	Total	150:01:48			11954,29
MÁQUINA 7	1	0:04:38	25	0,16	14,25
	2	3:12:19	9	3,78	340,40
	3	68:09:54	17	139,74	12576,44
	4	0:11:58	30	0,41	36,80
	5	0:12:01	32	0,41	36,95
	6	1:17:53	7	0,69	62,15
	7	0:26:51	6	0,14	12,93
	8	11:49:20	5	2,06	185,14
	9	0:03:34	14	0,12	10,97
	10	0:38:03	23	1,30	117,00
	11	0:03:28	22	0,12	10,66
	12	1:02:40	26	2,14	192,70
	13	6:56:12	8	5,65	508,80
	14	0:10:00	9	0,20	17,70
	15	3:22:32	7	1,80	161,62
	16	17:08:54	8	13,98	1257,83
	17	0:03:45	21	0,13	11,53
	18	0:03:41	20	0,13	11,33
	19	0:03:40	14	0,13	11,27
	20	0:12:22	14	0,42	38,03
	21	0:14:42	8	0,20	17,97
	22	0:56:05	7	0,50	44,75
	23	0:03:58	8	0,05	4,85
	24	0:40:19	2	0,00	0,18
	25	13:43:08	6	4,40	396,34
	26	0:48:37	2	0,00	0,22
	27	0:18:37	5	0,05	4,86
	28	0:03:57	14	0,13	12,15
	29	1:12:45	12	2,43	218,25
	30	0:03:25	14	0,12	10,51
	31	0:03:26	13	0,12	10,56
	32	0:04:21	11	0,14	12,33
	33	4:42:10	6	1,51	135,86
	34	0:03:33	11	0,11	10,06
	35	2:00:10	19	4,11	369,51
	36	0:13:57	3	0,01	0,52
	37	0:24:55	14	0,85	76,62
	38	6:17:03	18	12,88	1159,43
	39	5:19:48	20	10,93	983,39
	40	0:05:55	8	0,08	7,23
	41	16:06:11	5	2,80	252,17
	42	0:07:18	11	0,23	20,70

	43	2:24:40	18	4,94	444,85
	44	0:34:33	9	0,68	61,15
	45	0:46:59	8	0,64	57,44
	46	0:22:47	6	0,12	10,97
	47	12:18:38	5	2,14	192,78
	48	0:19:41	16	0,67	60,53
	49	4:07:18	18	8,45	760,45
	50	0:13:36	12	0,45	40,80
	51	3:59:37	11	7,55	679,31
	52	5:32:32	11	10,47	942,73
	Total	199:28:26			22613,98
MÁQUINA 8	1	1:53:06	22	3,86	347,78
	2	14:43:20	19	30,18	2716,25
	3	0:37:09	23	1,27	114,24
	4	3:07:38	14	6,41	576,97
	5	12:10:58	6	3,91	351,96
	6	19:22:50	11	36,63	3296,63
	7	1:01:50	6	0,33	29,77
	8	15:16:41	10	24,63	2216,54
	9	0:42:40	2	0,00	0,19
	10	0:13:32	4	0,02	1,66
	11	0:53:43	3	0,02	2,01
	12	1:19:34	11	2,51	225,57
	13	3:04:58	5	0,54	48,28
	14	0:20:06	2	0,00	0,09
	15	0:04:47	12	0,16	14,35
	Total	74:52:52			9942,31
MÁQUINA 9	1	0:47:19	22	1,62	145,50
	2	0:12:20	28	0,42	37,93
	3	16:19:25	15	33,46	3011,71
	4	0:03:30	23	0,12	10,76
	5	1:12:34	5	0,21	18,94
	6	0:03:19	25	0,11	10,20
	7	1:05:58	6	0,35	31,76
	8	0:03:39	12	0,12	10,95
	9	0:45:30	3	0,02	1,71
	10	0:13:45	6	0,07	6,62
	11	0:48:09	2	0,00	0,22
	12	0:03:46	15	0,13	11,58
	13	0:03:31	13	0,12	10,81
	14	0:07:38	5	0,02	1,99
	15	0:20:20	2	0,00	0,09
	Total	22:10:43			3310,77
MÁQUINA 10	1	0:16:52	13	0,58	51,87
	2	0:19:11	25	0,66	58,99
	3	31:38:42	9	37,34	3360,70
	4	50:51:11	4	4,17	375,30
	5	0:04:08	8	0,06	5,05
	6	0:05:27	8	0,07	6,66
	7	0:55:58	2	0,00	0,25
	8	1:15:00	2	0,00	0,34
	9	0:05:39	8	0,08	6,91

Anexo C– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11

	10	0:24:06	1	0,00	0,00
	11	0:06:06	5	0,02	1,59
	12	1:04:29	6	0,34	31,05
	13	0:07:21	3	0,00	0,28
	14	3:02:36	1	0,00	0,00
	15	0:44:08	2	0,00	0,20
	16	0:13:46	5	0,04	3,59
	17	0:48:13	2	0,00	0,22
	18	1:33:25	6	0,50	44,98
	19	0:24:11	2	0,00	0,11
	20	10:18:51	8	8,41	756,54
	21	1:30:13	11	2,84	255,76
	Total	105:49:33			4960,38
MÁQUINA 11	1	0:12:16	30	0,42	37,72
	2	16:06:18	21	33,02	2971,37
	3	1:33:38	15	3,20	287,92
	4	9:54:57	22	20,33	1829,47
	5	0:03:32	13	0,12	10,86
	6	1:35:11	2	0,00	0,43
	7	0:47:54	8	0,65	58,56
	8	0:45:59	2	0,00	0,21
	9	5:33:24	4	0,46	41,01
	10	0:13:44	7	0,12	10,96
	11	1:28:26	2	0,00	0,40
	12	4:25:35	7	2,35	211,94
	13	0:17:10	2	0,00	0,08
Total	42:58:04			5460,92	
MÁQUINA 12	1	16:26:38	10	26,51	2385,68
	2	0:58:13	6	0,31	28,03
	3	0:44:49	2	0,00	0,20
	4	0:13:50	4	0,02	1,70
	5	1:23:13	2	0,00	0,37
	6	0:12:03	2	0,00	0,05
	7	0:59:20	2	0,00	0,27
	8	8:43:53	1	0,00	0,00
	9	6:18:43	2	0,02	1,70
	10	3:21:52	1	0,00	0,00
	11	1:05:01	1	0,00	0,00
	12	1:11:47	1	0,00	0,00
	13	0:40:51	4	0,06	5,02
	14	0:15:50	1	0,00	0,00
	15	8:09:39	2	0,02	2,20
	16	9:50:33	1	0,00	0,00
	17	1:39:44	2	0,00	0,45
	18	1:27:02	2	0,00	0,39
	19	1:00:33	1	0,00	0,00
Total	64:43:34			2426,08	
MÁQUINA 13	1	15:43:10	17	32,22	2900,24
	2	0:17:44	21	0,61	54,53
	3	0:59:32	5	0,17	15,54
	4	0:44:37	3	0,02	1,67
	5	0:14:46	5	0,04	3,85

	6	2:09:10	2	0,01	0,58
	7	0:17:24	2	0,00	0,08
	Total	20:26:23			2976,49
MÁQUINA 14	1	0:44:40	18	1,53	137,35
	2	0:16:00	25	0,55	49,20
	3	0:43:53	27	1,50	134,94
	4	0:16:19	19	0,56	50,17
	5	0:59:12	5	0,17	15,45
	6	12:14:54	7	6,52	586,45
	7	0:44:23	4	0,06	5,46
	8	0:15:58	5	0,05	4,17
	9	1:12:58	2	0,00	0,33
	10	1:13:44	7	0,65	58,84
	11	0:04:16	11	0,13	12,10
	12	0:27:12	2	0,00	0,12
	Total	19:13:29			1054,58
MÁQUINA 15	1	0:45:11	16	1,54	138,94
	2	0:05:39	16	0,19	17,37
	3	0:09:00	13	0,31	27,67
	4	0:04:05	23	0,14	12,56
	5	0:04:15	19	0,15	13,07
	6	0:04:27	15	0,15	13,68
	7	0:04:15	19	0,15	13,07
	8	0:37:44	12	1,26	113,20
	9	0:04:08	23	0,14	12,71
	10	0:04:10	23	0,14	12,81
	11	0:04:03	23	0,14	12,45
	12	0:04:13	22	0,14	12,97
	13	0:04:06	22	0,14	12,61
	14	3:36:01	14	7,38	664,25
	15	76:51:48	10	123,90	11151,33
	16	2:35:38	17	5,32	478,57
	17	16:17:44	9	19,23	1730,59
	18	1:54:47	12	3,83	344,35
	19	4:17:25	15	8,80	791,56
	20	0:07:41	18	0,26	23,63
	21	0:05:37	22	0,19	17,27
	22	0:04:16	15	0,15	13,12
	23	0:05:29	24	0,19	16,86
	24	0:04:22	19	0,15	13,43
	25	2:40:07	10	4,30	387,16
	26	0:08:41	16	0,30	26,70
	27	0:40:12	19	1,37	123,61
	28	0:04:29	12	0,15	13,45
	29	0:04:33	13	0,16	13,99
	30	0:56:29	5	0,16	14,74
	31	0:04:17	16	0,15	13,17
	32	0:04:13	19	0,14	12,97
	33	0:04:16	19	0,15	13,12
	34	3:27:47	9	4,09	367,78
	35	0:41:14	4	0,06	5,07
	36	0:15:50	2	0,00	0,07
	37	0:54:20	2	0,00	0,24

Anexo C– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11

	38	1:04:12	12	2,14	192,60
	39	0:15:45	13	0,54	48,43
	40	0:28:19	10	0,76	68,47
	41	1:52:16	15	3,84	345,22
	42	0:18:33	14	0,63	57,04
	43	0:37:11	11	1,17	105,41
	44	15:24:29	7	8,20	737,74
	45	1:07:36	14	2,31	207,87
	46	0:22:58	12	0,77	68,90
	47	0:05:06	15	0,17	15,68
	48	5:53:23	10	9,49	854,48
	49	0:19:40	22	0,67	60,47
	50	0:04:27	16	0,15	13,68
	51	0:04:41	19	0,16	14,40
	52	0:05:07	24	0,17	15,73
	53	0:04:45	12	0,16	14,25
	54	0:05:00	24	0,17	15,37
	55	0:05:45	17	0,20	17,68
	56	1:00:49	16	2,08	187,01
	57	0:15:39	13	0,53	48,12
	58	4:06:30	13	8,42	757,99
	59	0:05:01	19	0,17	15,43
	60	0:44:23	13	1,52	136,48
	61	0:25:06	13	0,86	77,18
	62	9:12:28	10	14,84	1335,86
	63	0:04:32	20	0,15	13,94
	64	0:04:27	12	0,15	13,35
	65	0:05:12	14	0,18	15,99
	66	0:05:35	18	0,19	17,17
	67	0:04:36	21	0,16	14,14
	68	0:03:44	15	0,13	11,48
	69	0:04:31	19	0,15	13,89
	70	0:04:41	24	0,16	14,40
	71	5:50:32	17	11,98	1077,89
	72	0:25:08	10	0,68	60,77
	73	0:27:31	2	0,00	0,12
	Total	169:52:10			20512,15
MÁQUINA 16	1	54:13:47	7	28,85	2596,52
	2	0:37:52	2	0,00	0,17
	3	0:57:22	3	0,02	2,15
	4	0:46:34	3	0,02	1,75
	5	0:16:49	3	0,01	0,63
	6	0:53:18	2	0,00	0,24
	7	0:03:57	17	0,13	12,15
	8	0:04:26	10	0,12	10,72
	9	0:21:46	3	0,01	0,82
	Total	58:15:51			2625,14
MÁQUINA 17	1	262:09:54	2	0,79	70,78
	2	1:09:26	2	0,00	0,31
	3	0:31:22	1	0,00	0,00
	4	1:28:40	2	0,00	0,40
	5	0:06:13	5	0,02	1,62

	6	0:07:05	5	0,02	1,85
	7	1:17:10	6	0,41	37,16
	8	0:06:40	6	0,04	3,21
	9	0:08:13	8	0,11	10,04
	10	0:41:35	2	0,00	0,19
	11	0:06:18	9	0,12	11,15
	12	4:56:43	6	1,59	142,87
	13	0:39:36	3	0,02	1,48
	14	0:06:21	5	0,02	1,66
	15	2:36:00	5	0,45	40,72
	16	16:04:53	6	5,16	464,59
	17	3:10:32	7	1,69	152,05
	18	0:18:40	10	0,50	45,14
	19	0:04:03	24	0,14	12,45
	20	0:38:15	6	0,20	18,42
	21	0:22:24	3	0,01	0,84
	Total	296:50:03			1016,93
MÁQUINA 18	1	1:10:37	3	0,03	2,65
	2	0:06:45	7	0,06	5,39
	3	0:06:18	5	0,02	1,64
	4	5:41:27	8	4,64	417,42
	5	0:05:53	8	0,08	7,19
	6	1:09:43	2	0,00	0,31
	7	0:05:38	9	0,11	9,97
	8	2:08:02	8	1,74	156,52
	9	2:18:20	8	1,88	169,11
	10	0:47:23	2	0,00	0,21
	11	0:30:24	1	0,00	0,00
	12	0:50:57	3	0,02	1,91
	13	0:09:35	11	0,30	27,17
	14	0:13:25	11	0,42	38,04
	15	0:06:03	7	0,05	4,83
	16	0:20:09	3	0,01	0,76
	17	0:05:29	20	0,19	16,86
	Total	15:56:08			859,99
MÁQUINA 19	1	0:29:07	2	0,00	0,13
	2	0:05:46	6	0,03	2,78
	3	31:55:46	8	26,02	2342,02
	4	0:05:13	17	0,18	16,04
	5	0:06:52	4	0,01	0,84
	6	0:06:24	7	0,06	5,11
	7	0:06:09	5	0,02	1,61
	8	0:06:40	7	0,06	5,32
	9	0:06:59	7	0,06	5,57
	10	1:23:14	5	0,24	21,72
	11	1:29:56	5	0,26	23,47
	12	0:07:25	2	0,00	0,03
	13	0:07:25	5	0,02	1,94
	14	1:03:49	5	0,19	16,66
	15	0:06:08	8	0,08	7,50
	16	0:03:51	5	0,01	1,00
	17	0:06:28	6	0,03	3,11

Anexo C– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E11

	18	0:05:54	7	0,05	4,71
	19	4:11:37	7	2,23	200,79
	20	0:44:16	2	0,00	0,20
	21	0:31:08	2	0,00	0,14
	22	0:51:26	2	0,00	0,23
	23	0:24:11	7	0,21	19,30
	24	0:09:52	3	0,00	0,37
	Total	44:35:36			2680,60
MÁQUINA 20	1	0:12:49	23	0,44	39,41
	2	0:11:38	32	0,40	35,77
	3	0:05:55	22	0,20	18,19
	4	0:12:29	33	0,43	38,39
	5	0:11:37	26	0,40	35,72
	6	13:35:56	10	21,92	1972,93
	7	2:43:06	7	1,45	130,15
	8	0:43:38	3	0,02	1,64
	9	0:31:17	2	0,00	0,14
	10	0:53:29	2	0,00	0,24
	11	0:09:51	3	0,00	0,37
	Total	19:31:45			2272,95
MÁQUINA 21	1	0:11:55	26	0,41	36,64
	2	0:12:13	25	0,42	37,57
	3	0:05:28	22	0,19	16,81
	4	0:12:16	25	0,42	37,72
	5	15:08:10	14	31,03	2792,61
	6	0:13:22	22	0,46	41,10
	7	0:19:21	6	0,10	9,32
	8	0:13:03	26	0,45	40,13
	9	0:20:28	26	0,70	62,93
	10	11:59:52	8	9,78	880,04
	11	1:06:09	7	0,59	52,79
	12	0:43:10	2	0,00	0,19
	13	0:29:49	2	0,00	0,13
	14	0:53:18	4	0,07	6,56
	15	0:03:52	12	0,13	11,60
	16	0:03:59	14	0,14	12,25
	17	0:09:35	11	0,30	27,17
	18	0:46:44	9	0,92	82,72
	19	1:56:15	11	3,66	329,57
	20	0:11:41	4	0,02	1,44
	21	0:03:32	14	0,12	10,87
	22	0:27:32	5	0,08	7,19
	23	0:16:00	4	0,02	1,97
	Total	36:07:44			4499,31
TOTAL		1609:32:52			129733,2

Anexo D – Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E9

	<i>Estado E9 (Falha de controlo de carga)</i>				
	Ocorrência n.º	Tempo indisponível	Velocidade média do vento (m/s)	Energia perdida (MW)	Custo Indisponibilidade (€)
MÁQUINA 1	1	10:23:28	13	21,30	1917,16
	2	9:46:31	18	20,04	1803,54
	3	3:22:02	6	1,08	97,28
	4	0:04:00	25	0,14	12,30
	5	0:10:06	21	0,35	31,06
	6	3:03:09	15	6,26	563,19
	7	1:48:39	19	3,71	334,10
	8	0:03:35	19	0,12	11,02
	9	0:05:04	27	0,17	15,58
	10	4:49:02	22	9,88	888,78
	11	1:11:42	13	2,45	220,48
	12	8:25:04	19	17,26	1553,08
	13	2:39:17	17	5,44	489,80
	Total	45:51:39			7937,35
MÁQUINA 2	1	0:06:36	7	0,06	5,27
	2	1:21:52	6	0,44	39,42
	3	0:03:39	21	0,12	11,22
	4	0:03:25	21	0,12	10,51
	5	0:03:26	22	0,12	10,56
	6	0:03:55	12	0,13	11,75
	7	0:03:54	13	0,13	11,99
	8	1:46:40	17	3,64	328,00
	9	0:05:02	5	0,01	1,31
Total	3:38:29			430,03	
MÁQUINA 3	1	3:51:09	14	7,90	710,79
	2	20:51:33	6	6,70	602,62
	3	0:04:12	27	0,14	12,91
	4	0:03:57	31	0,13	12,15
	5	4:59:18	10	8,04	723,71
Total	29:50:09			2062,18	
MÁQUINA 4	1	0:14:10	13	0,48	43,56
	2	0:06:37	11	0,21	18,76
	3	7:24:39	12	14,82	1333,95
	4	4:01:39	13	8,26	743,07
	5	23:17:21	4	1,91	171,87
	6	5:35:19	12	11,18	1005,95
Total	40:39:45			3317,17	
Q U I N	1	15:26:10	11	29,17	2625,68
	2	0:03:32	22	0,12	10,86

	3	0:07:03	17	0,24	21,68
	4	0:15:09	16	0,52	46,59
	5	0:11:27	19	0,39	35,21
	6	5:05:20	11	9,62	865,62
	7	2:46:17	15	5,68	511,32
	Total	23:54:58			4116,96
MÁQUINA 6	1	93:08:15	10	150,14	13512,39
	2	0:47:42	3	0,02	1,79
	3	2:26:27	3	0,06	5,49
	4	5:10:54	25	10,62	956,02
	Total	101:33:18			14475,69
MÁQUINA 7	1	68:05:48	13	139,60	12563,84
	2	0:13:28	16	0,46	41,41
	3	0:43:05	2	0,00	0,19
	4	1:11:29	4	0,10	8,79
	5	1:34:04	3	0,04	3,53
	6	5:38:41	5	0,98	88,40
	7	8:05:08	11	15,28	1375,35
	8	1:07:14	13	2,30	206,74
	9	2:30:07	10	4,03	362,98
	10	0:25:32	10	0,69	61,74
	11	0:40:45	10	1,09	98,53
	12	1:22:15	7	0,73	65,64
	13	2:23:46	4	0,20	17,68
	14	0:37:51	13	1,29	116,39
	15	1:08:40	7	0,61	54,80
	16	1:14:17	9	1,46	131,48
	17	1:54:04	7	1,01	91,03
	18	1:13:01	12	2,43	219,05
	19	1:22:14	9	1,62	145,55
	20	2:10:30	9	2,57	230,98
	21	1:46:44	12	3,56	320,20
	22	7:14:21	8	5,90	530,99
	23	0:26:34	10	0,71	64,24
	24	8:21:17	9	9,86	887,27
	25	0:09:12	12	0,31	27,60
	26	4:06:58	10	6,64	597,17
	27	0:03:13	15	0,11	9,89
	28	9:09:46	15	18,78	1690,53
	29	1:57:21	19	4,01	360,85
	30	0:03:22	13	0,12	10,35
	31	0:29:11	13	1,00	89,74
	32	0:08:16	39	0,28	25,42
	33	4:57:09	14	10,15	913,74
	34	4:56:02	21	10,11	910,30
	Total	147:31:25			22322,40
MÁQUINA 8	1	1:49:24	21	3,74	336,40
	2	14:39:54	15	30,06	2705,69
	3	3:03:50	13	6,28	565,29
	4	0:26:49	1	0,00	0,00

Anexo D– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E9

	5	6:24:54	2	0,02	1,73
	Total	26:24:51			3609,12
MÁQUINA 9	1	16:15:39	13	33,33	3000,12
	2	0:05:22	22	0,18	16,50
	3	0:03:20	21	0,11	10,25
	4	9:31:46	10	15,36	1382,53
	5	0:04:54	19	0,17	15,07
	6	0:08:03	25	0,28	24,75
	7	0:35:17	10	0,95	85,32
	8	15:42:48	2	0,05	4,24
	9	0:28:40	21	0,98	88,15
	Total	42:55:49			4626,94
MÁQUINA 10	1	15:42:01	17	32,19	2896,70
	2	0:03:32	19	0,12	10,86
	3	0:53:47	14	1,84	165,38
	4	0:03:46	20	0,13	11,58
	5	0:07:57	17	0,27	24,45
	6	0:03:33	17	0,12	10,92
	7	1:24:48	18	2,90	260,76
	8	5:08:58	17	10,56	950,07
	9	3:05:55	14	6,35	571,69
	10	0:17:40	10	0,47	42,72
	Total	26:51:57			4945,14
MÁQUINA 11	1	16:02:44	20	32,89	2960,40
	2	0:03:55	15	0,13	12,04
	3	0:17:17	17	0,59	53,15
	4	0:13:19	18	0,45	40,95
	5	0:04:22	19	0,15	13,43
	6	0:03:48	16	0,13	11,69
	7	9:25:07	10	15,18	1366,45
	8	1:30:30	12	3,02	271,50
	9	0:03:17	13	0,11	10,10
	10	0:03:27	25	0,12	10,61
	11	0:05:04	28	0,17	15,58
	12	5:52:49	21	12,05	1084,91
	13	4:45:57	27	9,77	879,30

	14	0:36:31	9	0,72	64,63
	Total	39:08:07			6794,74
MÁQUINA 12	1	16:22:48	7	8,71	784,27
	2	1:13:28	1	0,00	0,00
	3	18:19:20	4	1,50	135,22
	4	10:04:54	15	20,67	1860,07
	5	0:49:14	8	0,67	60,19
	6	1:21:35	7	0,72	65,10
	7	95:20:03	3	2,38	214,50
	8	1:10:37	8	0,96	86,33
	9	1:08:10	7	0,60	54,40
	Total	145:50:09			3260,08
MÁQUINA 13	1	15:39:24	12	31,31	2818,20
	2	30:06:40	8	24,54	2208,65
	3	18:41:22	5	3,25	292,68
	Total	64:27:26			5319,53
MÁQUINA 14	1	6:24:43	11	12,12	1090,67
	2	0:23:45	13	0,81	73,03
	3	0:08:33	13	0,29	26,29
	4	0:51:38	9	1,02	91,39
	5	0:03:58	17	0,14	12,20
	6	0:12:31	9	0,25	22,15
	7	0:04:17	12	0,14	12,85
	8	1:53:11	14	3,87	348,04
	9	0:05:23	14	0,18	16,55
	10	2:09:28	10	3,48	313,05
	Total	12:17:27			2006,23
MÁQUINA 15	1	76:46:25	8	62,57	5631,34
	2	0:15:51	6	0,08	7,63
	3	0:15:38	6	0,08	7,53
	4	0:46:29	10	1,25	112,40
	5	0:53:28	8	0,73	65,36
	6	0:59:02	12	1,97	177,10
	7	5:13:30	8	4,26	383,25
	8	1:33:39	6	0,50	45,09
	9	1:45:59	10	2,85	256,27

Anexo D– Tabela com número de falhas, tempos de indisponibilidades, energia desperdiçada e custos de indisponibilidade pela ocorrência do Estado E9

	10	5:44:15	8	4,68	420,85
	11	0:03:21	18	0,11	10,30
	Total	94:17:37			7117,12
MÁQUINA 16	1	18:59:17	7	10,10	909,15
	2	0:18:57	13	0,65	58,27
	3	0:05:17	10	0,14	12,78
	4	0:33:11	12	1,11	99,55
	5	0:07:18	11	0,23	20,70
	6	2:08:07	15	4,38	393,96
	7	0:25:39	14	0,88	78,87
	8	0:04:51	11	0,15	13,75
	9	6:49:57	14	14,01	1260,60
	10	1:02:41	10	1,68	151,57
	11	5:10:05	20	10,59	953,51
	12	1:05:47	7	0,58	52,50
		Total	36:51:07		
MÁQUINA 17	1	1:46:45	11	3,36	302,64
	2	0:23:13	18	0,79	71,39
	3	0:21:21	18	0,73	65,65
	4	0:03:39	16	0,12	11,22
	5	0:05:10	13	0,18	15,89
	6	8:05:16	14	16,58	1492,19
		Total	8:58:39		
MÁQUINA 18	1	0:21:35	17	0,74	66,37
	2	0:03:30	14	0,12	10,76
	3	0:03:38	9	0,07	6,43
	4	0:03:13	21	0,11	9,89
	5	0:10:41	22	0,37	32,85
	6	0:03:18	20	0,11	10,15
	7	0:04:04	23	0,14	12,50
	8	0:25:46	25	0,88	79,23
	9	0:07:43	22	0,26	23,73
	10	5:09:58	18	10,59	953,15
	11	0:36:35	27	1,25	112,49
	Total	7:10:01			1317,56
I N	1	15:43:10	14	32,22	2900,24

	2	0:14:16	23	0,49	43,87
	3	0:03:21	21	0,11	10,30
	4	0:03:44	20	0,13	11,48
	5	0:04:03	32	0,14	12,45
	6	0:05:48	28	0,20	17,83
	7	4:40:18	20	9,58	861,92
	Total	20:54:40			3858,10
MÁQUINA 20	1	0:06:35	23	0,22	20,24
	2	0:05:24	18	0,18	16,61
	3	0:03:41	13	0,13	11,33
	4	5:09:33	9	6,09	547,90
	5	3:17:58	23	6,76	608,75
	Total	8:43:11			1204,83
MÁQUINA 21	1	15:04:19	12	30,14	2712,95
	2	0:05:21	19	0,18	16,45
	3	0:14:37	16	0,50	44,95
	4	1:07:09	13	2,29	206,49
	5	4:53:31	15	10,03	902,56
	6	0:39:27	5	0,11	10,30
	Total	22:04:24			3893,69
TOTAL		949:55:08			108276,4

Anexo E – Tabela com tempo entre ocorrências do Estado E11

	<i>Entre a ocorrência i e a j</i>	<i>Tempo entre ocorrências E11</i>	<i>Tempo de pleno funcionamento (estado E1) entre ocorrências E11</i>	<i>Tempo entre ocorrências E11, exceto os tempos nos estados E2, E4, E5, E6, E7, E9, E10, E12 e E14</i>
MÁQUINA 1	Entre 1 e 2	207:49:31	140:04:37	141:14:00
	Entre 2 e 3	0:01:32	0:01:07	0:01:32
	Entre 3 e 4	0:29:09	0:16:09	0:29:09
	Entre 4 e 5	0:52:50	0:52:50	0:52:50
	Entre 5 e 6	2:19:51	1:52:28	2:19:51
	Entre 6 e 7	0:03:03	0:02:38	0:03:03
	Entre 7 e 8	132:38:19	95:25:12	96:23:08
	Entre 8 e 9	807:37:16	369:16:00	601:42:57
	Entre 9 e 10	0:00:55	0:00:30	0:00:55
	Entre 10 e 11	0:41:08	0:40:43	0:41:08
	Entre 11 e 12	0:01:01	0:00:36	0:01:01
	Entre 12 e 13	0:06:32	0:06:07	0:06:32
	Entre 13 e 14	0:17:43	0:04:12	0:17:43
	Entre 14 e 15	0:15:25	0:00:47	0:15:25
	Entre 15 e 16	4506:05:07	4100:51:17	4148:24:43
	Entre 16 e 17	22:26:20	7:59:17	21:12:37
	Entre 17 e 18	22:24:54	10:24:51	22:24:54
	Entre 18 e 19	7680:40:39	7276:32:02	7329:33:07
	MÁQUINA 2	Entre 1 e 2	0:30:31	0:17:51
Entre 2 e 3		0:02:37	0:02:12	0:02:37
Entre 3 e 4		0:05:15	0:05:15	0:05:15
Entre 4 e 5		0:18:14	0:17:48	0:18:14
Entre 5 e 6		0:13:18	0:12:52	0:13:18
Entre 6 e 7		3951:44:32	3368:26:15	3689:01:13
Entre 7 e 8		1369:59:28	1215:48:17	1223:57:18
Entre 8 e 9		129:38:23	87:57:05	124:43:32
Entre 9 e 10		22:25:09	9:18:15	22:25:09
Entre 10 e 11		22:21:59	10:21:51	22:21:59
Entre 11 e 12		2447:02:29	2357:55:06	2378:23:54
Entre 12 e 13		601:17:03	588:30:44	591:47:40
Entre 13 e 14		18:05:39	18:05:39	18:05:39
Entre 14 e 15		186:34:15	183:08:50	183:08:51
Entre 15 e 16		59:19:13	56:35:08	56:48:24
Entre 16 e 17		4:50:27	4:50:27	4:50:27
Entre 17 e 18		6:18:46	6:18:46	6:18:46
Entre 18 e 19		0:24:22	0:24:22	0:24:22
Entre 19 e 20		2:17:19	2:17:19	2:17:19
Entre 20 e 21		652:50:45	638:56:46	639:07:21
Entre 21 e 22		92:38:57	92:30:45	92:34:49
Entre 22 e 23	599:54:57	570:12:52	574:49:07	
Entre 23 e 24	457:19:49	392:34:56	396:06:07	
MÁQUINA 3	Entre 1 e 2	420:15:39	358:28:58	359:19:02
	Entre 2 e 3	0:22:10	0:21:45	0:22:10
	Entre 3 e 4	0:01:36	0:01:10	0:01:36
	Entre 4 e 5	0:07:00	0:06:35	0:07:00
	Entre 5 e 6	0:06:43	0:06:18	0:06:43

	Entre 6 e 7	0:02:39	0:02:14	0:02:39
	Entre 7 e 8	0:10:50	0:10:25	0:10:50
	Entre 8 e 9	898:06:24	565:18:49	765:50:42
	Entre 9 e 10	4507:53:15	3958:10:46	4184:47:38
	Entre 10 e 11	1411:41:56	1319:58:55	1365:47:47
	Entre 11 e 12	6314:26:20	5961:01:46	6022:32:32
MÁQUINA 4	Entre 1 e 2	1:52:41	1:32:26	1:45:11
	Entre 2 e 3	0:14:24	0:13:59	0:14:24
	Entre 3 e 4	1:54:45	1:38:41	1:51:19
	Entre 4 e 5	34:20:56	33:45:46	34:20:56
	Entre 5 e 6	157:17:03	78:50:34	145:17:21
	Entre 6 e 7	211:56:22	157:59:47	172:42:33
	Entre 7 e 8	2166:19:09	1873:45:28	1924:08:23
	Entre 8 e 9	2879:35:23	2551:08:11	2554:52:02
	Entre 9 e 10	22:26:41	9:19:24	22:26:41
	Entre 10 e 11	22:17:32	10:17:04	22:17:32
	Entre 11 e 12	16:28:15	16:28:15	16:28:15
	Entre 12 e 13	616:55:42	583:28:48	584:43:40
	Entre 13 e 14	819:00:48	781:38:17	787:52:12
	Entre 14 e 15	1132:27:16	1101:26:43	1111:01:20
	Entre 15 e 16	5087:20:32	4717:31:29	4743:46:12
MÁQUINA 5	Entre 1 e 2	0:17:44	0:17:19	0:17:44
	Entre 2 e 3	22:05:40	21:40:12	21:52:38
	Entre 3 e 4	1:12:17	1:04:36	1:12:17
	Entre 4 e 5	108:19:32	73:26:15	73:30:20
	Entre 5 e 6	205:01:05	72:05:33	73:13:51
	Entre 6 e 7	2190:07:33	1909:32:50	1947:30:59
	Entre 7 e 8	303:21:48	293:00:40	294:03:51
	Entre 8 e 9	2578:16:52	2383:31:24	2388:25:07
	Entre 9 e 10	22:22:16	9:15:05	22:22:16
	Entre 10 e 11	22:17:11	10:17:21	22:17:11
	Entre 11 e 12	172:54:25	169:19:03	169:33:32
	Entre 12 e 13	1190:01:38	1136:08:44	1141:30:41
	Entre 13 e 14	0:22:29	0:22:29	0:22:29
	Entre 14 e 15	6313:35:16	6008:55:04	6037:12:53
MÁQUINA 6	Entre 1 e 2	93:17:44	0:09:29	87:55:51
	Entre 2 e 3	2:20:00	2:20:00	2:20:00
	Entre 3 e 4	315:01:26	297:42:37	309:12:34
	Entre 4 e 5	2038:52:56	1982:04:38	2036:36:13
	Entre 5 e 6	2883:03:16	2778:10:47	2812:34:18
	Entre 6 e 7	22:25:47	22:20:25	22:25:47
	Entre 7 e 8	22:23:10	22:14:39	22:23:10
	Entre 8 e 9	644:28:47	637:50:37	643:04:48
	Entre 9 e 10	2361:32:29	2320:13:41	2335:31:45
	Entre 10 e 11	4667:51:07	2934:25:13	2966:11:06
	Entre 11 e 12	2229:52:05	2176:47:01	2227:29:29
	Entre 12 e 13	1493:13:13	1442:48:04	1451:45:08
MÁQUINA 7	Entre 1 e 2	114:12:55	85:27:46	107:09:30
	Entre 2 e 3	94:33:31	35:33:53	46:35:54
	Entre 3 e 4	80:19:13	61:36:08	77:28:19
	Entre 4 e 5	0:28:00	0:27:34	0:28:00
	Entre 5 e 6	15:23:38	15:23:38	15:23:38
	Entre 6 e 7	5:32:14	5:32:14	5:32:14
	Entre 7 e 8	0:01:46	0:01:46	0:01:46
	Entre 8 e 9	88:21:53	11:15:01	12:35:43
	Entre 9 e 10	8:02:03	7:06:03	8:02:03

	Entre 10 e 11	1:28:27	0:42:24	1:28:27
	Entre 11 e 12	0:21:28	0:03:08	0:21:28
	Entre 12 e 13	6:06:52	3:03:48	6:06:52
	Entre 13 e 14	121:33:47	59:53:24	59:53:24
	Entre 14 e 15	6:32:24	6:32:24	6:32:24
	Entre 15 e 16	0:23:25	0:23:25	0:23:25
	Entre 16 e 17	504:26:58	418:11:21	423:16:45
	Entre 17 e 18	0:02:31	0:02:06	0:02:31
	Entre 18 e 19	0:17:50	0:04:49	0:17:50
	Entre 19 e 20	14:36:29	13:30:43	14:36:29
	Entre 20 e 21	333:13:17	250:11:29	252:40:23
	Entre 21 e 22	1289:42:46	1204:45:38	1229:18:59
	Entre 22 e 23	657:15:46	597:29:48	598:14:46
	Entre 23 e 24	2226:28:03	1886:39:37	1893:00:39
	Entre 24 e 25	9:11:39	9:07:52	9:11:39
	Entre 25 e 26	22:23:21	10:22:54	22:23:21
	Entre 26 e 27	458:29:08	405:39:16	415:40:50
	Entre 27 e 28	124:42:05	97:00:00	103:23:33
	Entre 28 e 29	57:26:48	51:22:32	57:26:48
	Entre 29 e 30	464:29:49	388:21:15	413:24:32
	Entre 30 e 31	48:32:09	42:03:16	46:57:24
	Entre 31 e 32	8:53:09	1:19:50	8:53:09
	Entre 32 e 33	1:38:41	0:21:42	1:38:41
	Entre 33 e 34	17:08:57	7:55:08	17:02:52
	Entre 34 e 35	530:44:14	497:40:41	508:54:19
	Entre 35 e 36	5959:59:28	5545:31:10	5578:18:38
	Entre 36 e 37	1613:01:52	1508:54:49	1515:16:06
	Entre 37 e 38	0:00:59	0:00:59	0:00:59
	Entre 38 e 39	5:09:12	5:09:12	5:09:12
	Entre 39 e 40	4:23:33	4:18:14	4:18:14
	Entre 40 e 41	0:05:06	0:05:06	0:05:06
	Entre 41 e 42	27:42:08	27:42:08	27:42:08
	Entre 42 e 43	0:01:01	0:01:01	0:01:01
	Entre 43 e 44	0:02:08	0:02:08	0:02:08
	Entre 44 e 45	0:01:16	0:01:16	0:01:16
	Entre 45 e 46	0:02:47	0:02:47	0:02:47
	Entre 46 e 47	0:02:40	0:02:40	0:02:40
	Entre 47 e 48	52:03:36	51:59:37	52:03:36
	Entre 48 e 49	0:00:37	0:00:37	0:00:37
	Entre 49 e 50	486:05:00	408:51:14	409:29:26
	Entre 50 e 51	0:00:01	0:00:01	0:00:01
	Entre 51 e 52	5:48:35	5:48:35	5:48:35
MÁQUINA 8	Entre 1 e 2	0:01:36	0:01:10	0:01:36
	Entre 2 e 3	269:43:11	236:04:44	267:45:53
	Entre 3 e 4	117:22:16	80:52:19	81:04:22
	Entre 4 e 5	2:52:21	2:52:21	2:52:21
	Entre 5 e 6	516:25:01	349:34:18	351:58:58
	Entre 6 e 7	1631:05:10	1344:26:45	1369:05:28
	Entre 7 e 8	2142:44:01	1596:38:02	1608:32:50
	Entre 8 e 9	725:41:23	553:45:12	555:09:59
	Entre 9 e 10	24:43:05	9:16:38	24:43:05
	Entre 10 e 11	20:19:12	8:27:02	20:19:12
	Entre 11 e 12	631:48:29	520:58:53	521:32:15
	Entre 12 e 13	1111:36:46	1000:37:52	1011:28:49
	Entre 13 e 14	5932:41:58	5258:15:27	5278:19:25
	Entre 14 e 15	1741:05:07	1469:38:48	1477:23:41

MÁQUINA 9	Entre 1 e 2	40:52:48	40:52:22	40:52:48
	Entre 2 e 3	0:12:05	0:11:41	0:12:05
	Entre 3 e 4	21:56:46	21:31:22	21:56:46
	Entre 4 e 5	189:35:46	116:26:49	156:45:08
	Entre 5 e 6	54:38:03	47:45:18	49:07:22
	Entre 6 e 7	2305:13:33	1805:00:52	1848:43:43
	Entre 7 e 8	657:13:57	556:18:31	557:31:16
	Entre 8 e 9	2226:20:14	1771:48:31	1773:23:43
	Entre 9 e 10	24:40:35	9:14:19	24:40:35
	Entre 10 e 11	20:18:38	8:26:48	20:18:38
	Entre 11 e 12	2447:00:41	2174:01:34	2199:58:20
	Entre 12 e 13	2253:14:00	2053:29:11	2061:22:01
	Entre 13 e 14	2883:39:43	2470:08:36	2492:11:42
	Entre 14 e 15	96:28:04	72:13:36	85:13:45
	MÁQUINA 10	Entre 1 e 2	172:01:02	141:54:28
Entre 2 e 3		80:02:43	55:48:18	80:02:43
Entre 3 e 4		113:41:03	113:22:42	113:41:03
Entre 4 e 5		39:19:01	37:34:50	38:05:59
Entre 5 e 6		474:33:07	319:17:31	323:07:00
Entre 6 e 7		276:19:28	235:07:33	236:03:34
Entre 7 e 8		290:32:49	220:14:42	220:41:41
Entre 8 e 9		52:47:09	29:36:31	29:36:31
Entre 9 e 10		640:08:10	586:06:47	588:52:33
Entre 10 e 11		532:02:31	464:45:20	469:39:56
Entre 11 e 12		47:32:07	27:57:51	46:14:40
Entre 12 e 13		159:47:24	156:13:01	156:24:42
Entre 13 e 14		335:17:19	276:49:54	277:26:20
Entre 14 e 15		2385:24:37	1801:41:26	1810:41:33
Entre 15 e 16		24:41:58	9:14:30	24:41:58
Entre 16 e 17		20:18:38	8:26:48	20:18:38
Entre 17 e 18		2495:16:28	2173:25:10	2176:07:45
Entre 18 e 19		5183:47:27	4407:58:59	4430:53:20
Entre 19 e 20		699:25:57	559:43:41	567:55:44
Entre 20 e 21		2481:54:28	1972:35:57	2003:32:55
MÁQUINA 11		Entre 1 e 2	0:05:22	0:04:57
	Entre 2 e 3	142:16:03	127:07:03	137:52:33
	Entre 3 e 4	36:35:25	36:18:47	36:35:25
	Entre 4 e 5	65:28:47	55:21:57	56:21:39
	Entre 5 e 6	1860:46:51	1421:35:02	1444:09:38
	Entre 6 e 7	454:26:10	356:16:40	381:48:12
	Entre 7 e 8	2883:55:41	2218:49:36	2227:37:47
	Entre 8 e 9	3:03:25	2:58:51	3:03:25
	Entre 9 e 10	16:03:24	0:41:13	16:03:24
	Entre 10 e 11	20:18:36	8:22:25	20:18:36
	Entre 11 e 12	1544:35:45	1276:54:06	1304:50:23
	Entre 12 e 13	6130:55:46	5298:55:51	5341:01:38
	MÁQUINA 12	Entre 1 e 2	2572:36:48	2045:34:55
Entre 2 e 3		2883:45:23	2087:22:43	2104:19:47
Entre 3 e 4		24:41:21	9:13:58	24:41:21
Entre 4 e 5		20:18:31	8:26:42	20:18:31
Entre 5 e 6		7680:02:19	6288:10:52	6330:46:14
Entre 6 e 7		903:34:15	702:42:24	709:49:15
Entre 7 e 8		1100:49:51	795:30:39	796:19:40
Entre 8 e 9		330:19:02	220:51:39	221:04:01
Entre 9 e 10		860:05:30	751:05:05	753:18:43
Entre 10 e 11		68:07:08	51:07:16	51:13:36
Entre 11 e 12		32:01:59	16:19:24	16:23:52

	Entre 12 e 13	73:07:28	52:32:57	52:37:29
	Entre 13 e 14	0:27:27	0:19:59	0:19:59
	Entre 14 e 15	10:16:32	6:40:03	6:40:03
	Entre 15 e 16	44:35:18	34:12:08	37:40:24
	Entre 16 e 17	45:55:51	44:59:22	45:08:12
	Entre 17 e 18	242:40:40	196:54:30	197:02:43
	Entre 18 e 19	11:56:25	11:00:38	11:04:16
MÁQUINA 13	Entre 1 e 2	269:05:16	226:50:09	254:12:18
	Entre 2 e 3	2302:41:42	1992:25:30	2017:02:47
	Entre 3 e 4	2884:16:31	2378:03:03	2399:01:21
	Entre 4 e 5	24:41:20	9:15:13	24:41:20
	Entre 5 e 6	20:17:48	8:25:49	20:17:48
	Entre 6 e 7	7679:16:21	6943:59:33	6970:29:06
MÁQUINA 14	Entre 1 e 2	0:10:57	0:06:58	0:10:57
	Entre 2 e 3	956:20:13	697:44:11	773:44:14
	Entre 3 e 4	0:16:41	0:03:12	0:16:41
	Entre 4 e 5	1621:41:37	1435:45:43	1464:24:00
	Entre 5 e 6	414:13:27	325:33:41	330:44:26
	Entre 6 e 7	2457:48:30	1971:53:53	1993:18:29
	Entre 7 e 8	24:41:37	9:19:26	24:41:37
	Entre 8 e 9	20:16:32	8:24:33	20:16:32
	Entre 9 e 10	108:07:55	83:44:20	83:53:28
	Entre 10 e 11	2850:13:26	2574:11:48	2594:46:01
	Entre 11 e 12	4720:33:12	4046:22:59	4102:14:44
MÁQUINA 15	Entre 1 e 2	95:24:52	77:31:40	77:41:58
	Entre 2 e 3	72:52:09	36:31:53	36:59:17
	Entre 3 e 4	0:48:47	0:48:47	0:48:47
	Entre 4 e 5	0:10:29	0:10:29	0:10:29
	Entre 5 e 6	0:14:52	0:14:52	0:14:52
	Entre 6 e 7	0:11:48	0:11:48	0:11:48
	Entre 7 e 8	0:11:27	0:11:27	0:11:27
	Entre 8 e 9	1:09:27	1:09:27	1:09:27
	Entre 9 e 10	0:11:13	0:11:13	0:11:13
	Entre 10 e 11	0:12:02	0:12:02	0:12:02
	Entre 11 e 12	0:08:37	0:08:37	0:08:37
	Entre 12 e 13	0:06:19	0:06:19	0:06:19
	Entre 13 e 14	0:06:10	0:06:10	0:06:10
	Entre 14 e 15	35:15:27	32:56:40	34:06:43
	Entre 15 e 16	114:59:06	109:31:52	114:59:06
	Entre 16 e 17	7:04:28	4:20:36	7:04:28
	Entre 17 e 18	67:56:54	63:15:36	65:32:03
	Entre 18 e 19	106:52:57	80:19:06	80:23:35
	Entre 19 e 20	4:34:58	4:31:16	4:31:16
	Entre 20 e 21	0:16:33	0:16:33	0:16:33
	Entre 21 e 22	0:08:45	0:08:45	0:08:45
	Entre 22 e 23	0:07:43	0:07:43	0:07:43
	Entre 23 e 24	0:06:13	0:06:13	0:06:13
	Entre 24 e 25	0:11:44	0:11:44	0:11:44
	Entre 25 e 26	558:38:10	407:16:20	409:16:48
	Entre 26 e 27	0:52:25	0:52:25	0:52:25
	Entre 27 e 28	415:26:27	354:16:17	354:53:54
	Entre 28 e 29	0:21:37	0:21:37	0:21:37
	Entre 29 e 30	1205:05:25	1089:16:25	1112:33:09
	Entre 30 e 31	700:47:15	594:47:03	596:03:36
	Entre 31 e 32	0:25:42	0:25:42	0:25:42
	Entre 32 e 33	0:11:02	0:11:02	0:11:02

	Entre 33 e 34	1034:26:45	830:54:14	838:42:27
	Entre 34 e 35	1144:48:16	919:13:29	920:09:15
	Entre 35 e 36	24:44:46	9:17:47	24:44:46
	Entre 36 e 37	20:16:39	8:24:42	20:16:39
	Entre 37 e 38	792:38:13	678:37:58	679:19:24
	Entre 38 e 39	737:02:24	648:40:20	659:28:11
	Entre 39 e 40	6:07:01	5:54:55	6:07:01
	Entre 40 e 41	35:29:29	35:18:06	35:18:06
	Entre 41 e 42	313:55:43	285:28:54	286:31:48
	Entre 42 e 43	1:22:08	1:22:08	1:22:08
	Entre 43 e 44	2:06:34	2:02:04	2:06:34
	Entre 44 e 45	154:53:54	153:26:46	153:26:48
	Entre 45 e 46	2:30:08	2:30:08	2:30:08
	Entre 46 e 47	0:35:32	0:35:32	0:35:32
	Entre 47 e 48	1:30:52	1:30:52	1:30:52
	Entre 48 e 49	363:21:58	337:33:43	338:03:27
	Entre 49 e 50	1:49:27	1:49:27	1:49:27
	Entre 50 e 51	0:20:56	0:20:56	0:20:56
	Entre 51 e 52	0:18:41	0:18:41	0:18:41
	Entre 52 e 53	0:13:51	0:13:51	0:13:51
	Entre 53 e 54	0:17:33	0:17:33	0:17:33
	Entre 54 e 55	0:23:49	0:23:49	0:23:49
	Entre 55 e 56	0:17:02	0:17:02	0:17:02
	Entre 56 e 57	58:57:28	55:34:51	55:36:47
	Entre 57 e 58	0:13:31	0:13:31	0:13:31
	Entre 58 e 59	90:20:07	85:28:10	85:28:10
	Entre 59 e 60	8:41:26	8:41:26	8:41:26
	Entre 60 e 61	10:13:12	10:13:12	10:13:12
	Entre 61 e 62	1:01:09	1:01:09	1:01:09
	Entre 62 e 63	15:43:09	14:18:52	14:21:04
	Entre 63 e 64	0:33:53	0:33:53	0:33:53
	Entre 64 e 65	0:29:21	0:29:21	0:29:21
	Entre 65 e 66	360:06:29	312:21:06	337:10:38
	Entre 66 e 67	0:04:14	0:04:14	0:04:14
	Entre 67 e 68	0:02:58	0:02:58	0:02:58
	Entre 68 e 69	0:06:11	0:06:11	0:06:11
	Entre 69 e 70	0:06:57	0:06:57	0:06:57
	Entre 71 e 72	0:08:32	0:08:32	0:08:32
	Entre 72 e 73	30:28:18	30:20:37	30:20:37
	Entre 73 e 74	4636:56:55	4138:16:42	4162:34:48
MÁQUINA 16	Entre 1 e 2	932:43:20	752:06:15	767:26:05
	Entre 2 e 3	1564:14:16	1327:05:18	1354:06:49
	Entre 3 e 4	2884:18:41	2311:33:08	2317:46:45
	Entre 4 e 5	24:39:25	9:12:06	24:39:25
	Entre 5 e 6	20:15:44	8:14:10	20:15:44
	Entre 6 e 7	2694:43:07	2425:17:01	2446:48:34
	Entre 7 e 8	859:31:04	812:23:09	814:08:57
	Entre 8 e 9	4126:09:38	3704:27:17	3723:45:25
MÁQUINA 17	Entre 1 e 2	119:58:17	89:13:29	91:59:57
	Entre 2 e 3	51:43:53	38:54:37	38:58:43
	Entre 3 e 4	304:33:32	272:49:32	280:29:37
	Entre 4 e 5	33:25:12	27:17:44	27:17:44
	Entre 5 e 6	1199:12:02	1114:41:46	1133:57:19
	Entre 6 e 7	259:20:01	221:50:59	241:48:54
	Entre 7 e 8	219:13:38	192:47:56	193:12:51
	Entre 8 e 9	20:28:05	11:54:30	11:54:31

	Entre 9 e 10	39:18:00	34:03:36	34:07:45
	Entre 10 e 11	11:33:28	8:22:59	8:30:09
	Entre 11 e 12	380:33:16	309:19:01	314:53:52
	Entre 12 e 13	215:14:16	172:44:04	172:51:12
	Entre 13 e 14	162:04:55	125:21:41	125:25:45
	Entre 14 e 15	24:58:18	24:58:18	24:58:18
	Entre 15 e 16	47:39:21	45:18:18	45:24:29
	Entre 16 e 17	23:58:42	23:54:45	23:58:42
	Entre 17 e 18	2740:53:04	2252:42:52	2257:12:21
	Entre 18 e 19	552:43:34	521:32:29	524:35:59
	Entre 19 e 20	1774:13:27	1634:53:51	1649:21:45
	Entre 20 e 21	4368:20:47	4048:02:45	4065:04:51
MÁQUINA 18	Entre 1 e 2	6:48:13	4:28:58	4:28:58
	Entre 2 e 3	142:10:38	126:22:07	126:28:38
	Entre 3 e 4	678:43:09	626:09:47	628:30:32
	Entre 4 e 5	573:57:35	552:51:45	554:05:09
	Entre 5 e 6	289:28:11	285:05:31	289:26:39
	Entre 6 e 7	21:29:01	21:26:09	21:29:01
	Entre 7 e 8	130:35:45	103:16:15	122:15:14
	Entre 8 e 9	106:36:50	97:41:49	97:53:43
	Entre 9 e 10	2773:40:44	2401:25:15	2407:03:36
	Entre 10 e 11	22:19:44	9:12:17	22:19:44
	Entre 12 e 13	22:20:58	10:24:16	22:20:58
	Entre 13 e 14	574:17:21	541:45:49	542:26:15
	Entre 14 e 15	728:41:41	695:06:10	699:48:44
	Entre 15 e 16	797:11:02	718:55:21	740:55:19
	Entre 16 e 17	5579:55:24	5253:50:24	5299:14:23
	Entre 17 e 18	2614:59:32	2419:58:50	2430:29:30
MÁQUINA 19	Entre 1 e 2	4:05:22	4:05:22	4:05:22
	Entre 2 e 3	516:30:00	433:29:33	454:25:30
	Entre 3 e 4	82:11:34	73:30:30	82:11:34
	Entre 4 e 5	273:50:17	129:37:08	132:46:05
	Entre 5 e 6	246:25:00	208:43:11	212:25:37
	Entre 6 e 7	75:25:58	62:36:15	62:36:15
	Entre 7 e 8	411:38:12	364:31:46	365:58:26
	Entre 8 e 9	137:08:53	130:28:16	130:59:04
	Entre 9 e 10	549:40:34	504:58:09	506:46:54
	Entre 10 e 11	21:48:45	21:48:45	21:48:45
	Entre 11 e 12	209:30:01	207:28:37	207:47:24
	Entre 12 e 13	4:00:25	4:00:25	4:00:25
	Entre 13 e 14	505:00:43	464:46:18	489:19:50
	Entre 14 e 15	574:46:14	527:10:26	528:31:32
	Entre 15 e 16	82:14:56	81:56:23	82:14:56
	Entre 16 e 17	401:52:31	299:48:17	300:20:08
	Entre 17 e 18	411:32:02	403:14:45	403:55:37
	Entre 18 e 19	483:23:07	460:05:31	460:38:16
	Entre 19 e 20	925:17:17	721:41:56	722:19:10
	Entre 20 e 21	22:22:51	9:14:39	22:22:51
	Entre 21 e 22	22:20:57	10:19:14	22:20:57
Entre 22 e 23	2272:59:04	2183:26:18	2190:54:31	
Entre 23 e 24	5407:10:04	5130:43:35	5161:46:58	
MÁQUINA A 20	Entre 1 e 2	0:12:38	0:08:27	0:12:38
	Entre 2 e 3	1:07:03	0:53:47	1:07:03
	Entre 3 e 4	0:02:34	0:02:09	0:02:34
	Entre 4 e 5	0:04:27	0:04:02	0:04:27
	Entre 5 e 6	0:25:37	0:25:11	0:25:37

	Entre 6 e 7	282:01:40	162:57:04	196:45:58
	Entre 7 e 8	5171:56:15	4656:46:19	4704:46:13
	Entre 8 e 9	22:23:22	9:16:23	22:23:22
	Entre 9 e 10	22:20:15	10:20:11	22:20:15
	Entre 10 e 11	7680:32:03	7362:39:14	7403:55:51
MÁQUINA 21	Entre 1 e 2	0:18:43	0:18:17	0:18:43
	Entre 2 e 3	0:03:05	0:02:44	0:03:05
	Entre 3 e 4	0:02:14	0:01:48	0:02:14
	Entre 4 e 5	0:14:43	0:14:17	0:14:43
	Entre 5 e 6	23:16:57	22:46:44	23:16:57
	Entre 6 e 7	53:50:25	14:42:08	14:55:14
	Entre 7 e 8	188:16:57	102:34:52	103:34:37
	Entre 8 e 9	1:10:51	0:16:56	1:10:51
	Entre 9 e 10	125:56:44	64:47:38	66:14:35
	Entre 10 e 11	2166:52:29	2013:42:46	2043:12:01
	Entre 11 e 12	2883:37:47	2597:40:52	2608:20:44
	Entre 12 e 13	22:23:55	9:15:47	22:23:55
	Entre 13 e 14	22:21:36	10:20:54	22:21:36
	Entre 14 e 15	792:36:59	755:49:45	756:44:04
	Entre 15 e 16	74:13:59	72:46:05	72:48:15
	Entre 16 e 17	5:55:13	5:55:13	5:55:13
	Entre 17 e 18	107:26:40	100:14:48	100:24:38
	Entre 18 e 19	0:00:04	0:00:04	0:00:04
	Entre 19 e 20	2845:04:02	2770:35:52	2780:51:05
	Entre 20 e 21	871:44:11	836:17:10	842:27:34
Entre 21 e 22	2212:53:13	2128:47:24	2133:53:36	
Entre 22 e 23	766:54:36	694:33:49	708:30:33	

Anexo F – Tabela com tempo entre ocorrências do Estado E9

	<i>Entre a ocorrência i e a j</i>	<i>Tempo entre ocorrências E9</i>	<i>Tempo de pleno funcionamento (estado E1) entre ocorrências E9</i>	<i>Tempo entre ocorrências E9, exceto os estados E2, E4, E5, E6, E7, E10, E11, E12 e E14</i>
MÁQUINA 1	Entre 1 e 2	132:41:55	95:25:12	96:26:44
	Entre 2 e 3	3995:44:59	3327:55:57	3607:12:05
	Entre 3 e 4	2894:13:02	2619:41:03	2655:50:36
	Entre 4 e 5	2:39:53	2:39:13	2:39:53
	Entre 5 e 6	1:53:55	1:52:26	1:53:55
	Entre 6 e 7	34:26:34	33:51:56	34:26:34
	Entre 7 e 8	3:45:33	3:19:13	3:45:33
	Entre 8 e 9	141:27:12	135:22:18	137:43:39
	Entre 9 e 10	783:05:38	770:24:45	772:17:16
	Entre 10 e 11	1505:31:27	1449:22:08	1452:49:00
	Entre 11 e 12	57:44:06	57:02:35	57:44:06
	Entre 12 e 13	5225:31:11	4879:23:59	4902:53:14
MÁQUINA 2	Entre 1 e 2	520:13:16	458:21:44	462:48:54
	Entre 2 e 3	2224:34:15	2009:13:23	2090:02:05
	Entre 3 e 4	1:31:08	1:26:32	1:31:08
	Entre 4 e 5	3:37:10	3:35:56	3:37:10
	Entre 5 e 6	9:43:21	9:42:15	9:43:21
	Entre 6 e 7	138:41:29	136:57:14	138:41:29
	Entre 7 e 8	2:17:35	1:56:31	2:17:35
	Entre 8 e 9	1257:28:18	1226:26:55	1229:15:45
MÁQUINA 3	Entre 1 e 2	178:20:16	170:11:14	172:24:00
	Entre 2 e 3	1367:19:31	1331:44:08	1334:16:27
	Entre 3 e 4	0:17:09	0:16:10	0:17:09
	Entre 4 e 5	0:06:27	0:05:54	0:06:27
MÁQUINA 4	Entre 1 e 2	4:32:33	4:25:27	4:32:33
	Entre 2 e 3	533:28:54	527:58:52	528:25:14
	Entre 3 e 4	428:35:11	417:30:34	417:47:30
	Entre 4 e 5	176:51:16	170:16:10	172:24:25
	Entre 5 e 6	1304:23:00	1256:03:38	1265:24:09
MÁQUINA 5	Entre 1 e 2	7035:12:41	6242:58:54	6324:37:55
	Entre 2 e 3	2:39:46	2:38:57	2:39:46
	Entre 3 e 4	1:36:14	1:35:29	1:36:14
	Entre 4 e 5	969:38:42	949:30:57	951:01:27
	Entre 5 e 6	1570:37:34	1525:25:47	1527:04:09
	Entre 6 e 7	5225:04:49	4898:44:08	4925:33:39
MÁQUINA 6	Entre 1 e 2	3767:52:05	3500:51:46	3670:45:47
	Entre 2 e 3	0:00:14	0:00:14	0:00:14
	Entre 3 e 4	5731:30:19	5620:09:48	5670:42:13
MÁQUINA 7	Entre 1 e 2	3178:23:48	2655:47:16	2756:49:30
	Entre 2 e 3	1790:07:04	1524:17:50	1529:35:24
	Entre 3 e 4	884:37:56	750:25:05	778:14:49
	Entre 4 e 5	1:17:16	1:05:37	1:17:16
	Entre 5 e 6	32:33:09	22:08:46	22:52:44
	Entre 6 e 7	122:24:30	102:23:19	103:34:44
	Entre 7 e 8	55:08:43	53:58:46	55:08:43
	Entre 8 e 9	2:15:48	2:06:47	2:15:48
	Entre 9 e 10	3:18:28	3:08:13	3:18:28
	Entre 10 e 11	1:01:49	0:57:19	1:01:49

	Entre 11 e 12	7:08:13	5:50:23	7:08:13
	Entre 12 e 13	116:39:47	112:10:02	112:37:45
	Entre 13 e 14	24:35:42	22:54:23	23:12:38
	Entre 14 e 15	70:04:48	58:59:28	60:12:31
	Entre 15 e 16	57:37:57	32:26:43	45:17:12
	Entre 16 e 17	119:44:03	103:10:29	103:57:43
	Entre 17 e 18	1:19:52	1:06:50	1:19:52
	Entre 18 e 19	77:38:38	70:07:03	71:04:37
	Entre 19 e 20	0:19:04	0:18:54	0:19:04
	Entre 20 e 21	0:18:10	0:08:18	0:18:10
	Entre 21 e 22	24:00:00	23:24:00	23:51:59
	Entre 22 e 23	2:24:54	1:24:23	2:24:54
	Entre 23 e 24	13:42:08	8:06:01	9:15:02
	Entre 24 e 25	0:04:27	0:04:18	0:04:27
	Entre 25 e 26	0:05:49	0:01:33	0:05:49
	Entre 26 e 27	341:29:36	340:21:00	341:10:16
	Entre 27 e 28	2:11:17	2:10:20	2:11:17
	Entre 28 e 29	173:40:24	155:07:48	155:48:35
	Entre 29 e 30	777:35:32	664:47:18	666:38:22
	Entre 30 e 31	507:17:58	495:09:05	498:32:28
	Entre 31 e 32	1069:32:54	1050:23:41	1050:49:58
	Entre 32 e 33	0:23:48	0:23:19	0:23:48
	Entre 33 e 34	5225:03:02	4848:52:47	4884:23:05
MÁQUINA 8	Entre 1 e 2	0:05:02	0:01:10	0:05:02
	Entre 2 e 3	387:46:24	316:57:03	349:31:12
	Entre 3 e 4	14874:26:40	12344:20:43	12502:00:29
	Entre 4 e 5	268:49:02	200:32:59	203:40:42
MÁQUINA 9	Entre 1 e 2	7028:24:36	5644:44:38	5778:34:03
	Entre 2 e 3	10:41:09	10:26:12	10:41:09
	Entre 3 e 4	0:38:47	0:37:08	0:38:47
	Entre 4 e 5	1491:02:29	1409:37:27	1413:27:58
	Entre 5 e 6	977:40:59	884:28:04	886:19:09
	Entre 6 e 7	1240:56:18	1117:32:40	1120:51:07
	Entre 7 e 8	2234:11:42	1898:58:06	1906:05:11
Entre 8 e 9	1800:40:48	1506:50:22	1531:19:34	
MÁQUINA 10	Entre 1 e 2	4300:41:56	3443:45:20	3514:38:59
	Entre 2 e 3	9:11:12	8:28:48	9:11:12
	Entre 3 e 4	2724:12:50	2150:45:40	2184:42:41
	Entre 4 e 5	2:40:05	2:38:41	2:40:05
	Entre 5 e 6	140:07:42	113:07:05	113:25:34
	Entre 6 e 7	761:38:29	715:07:07	715:22:54
	Entre 7 e 8	1638:59:04	1410:24:34	1414:04:14
	Entre 8 e 9	5225:09:42	4318:59:18	4353:32:00
Entre 9 e 10	1:22:34	1:02:03	1:22:34	
MÁQUINA 11	Entre 1 e 2	6135:02:24	4717:18:18	4841:21:00
	Entre 2 e 3	899:56:25	782:50:23	791:53:04
	Entre 3 e 4	2:26:19	2:25:27	2:26:19
	Entre 4 e 5	1:29:54	1:29:09	1:29:54
	Entre 5 e 6	0:15:29	0:14:41	0:15:29
	Entre 6 e 7	0:08:18	0:07:27	0:08:18
	Entre 7 e 8	33:31:06	29:01:01	33:31:06
	Entre 8 e 9	918:01:07	837:56:09	838:30:39
	Entre 9 e 10	146:39:05	140:39:33	141:13:17
	Entre 10 e 11	1368:45:41	1214:30:28	1225:58:09
	Entre 11 e 12	0:06:35	0:04:03	0:06:35
	Entre 12 e 13	56:26:20	56:18:25	56:22:40

MÁQUINA 12	Entre 13 e 14	1173:57:03	1028:00:09	1029:24:14
	Entre 1 e 2	3435:19:01	2655:30:23	2689:14:27
	Entre 2 e 3	97:09:08	49:24:14	49:24:51
	Entre 3 e 4	3487:28:42	2707:41:01	2743:28:05
	Entre 4 e 5	1429:12:54	1268:15:06	1272:44:42
	Entre 5 e 6	1:42:07	1:42:07	1:42:07
	Entre 6 e 7	976:21:48	839:29:10	839:55:54
	Entre 7 e 8	7:53:45	7:53:45	7:53:45
MÁQUINA 14	Entre 8 e 9	3:44:27	3:44:27	3:44:27
	Entre 1 e 2	20:15:40	19:56:37	20:15:40
	Entre 2 e 3	3482:40:03	2960:38:48	2988:09:38
	Entre 1 e 2	3274:12:24	2674:28:25	2809:27:22
	Entre 2 e 3	479:56:10	356:02:18	372:13:57
	Entre 3 e 4	592:08:08	517:02:07	520:23:23
	Entre 4 e 5	1831:25:23	1440:11:17	1471:18:12
	Entre 5 e 6	533:15:12	471:26:41	475:49:33
MÁQUINA 15	Entre 6 e 7	318:09:34	301:56:24	302:21:59
	Entre 7 e 8	50:59:23	50:28:52	50:36:41
	Entre 8 e 9	0:11:01	0:08:50	0:11:01
	Entre 9 e 10	2462:11:19	2206:50:53	2236:32:34
	Entre 1 e 2	3581:16:29	2952:39:48	3020:43:33
	Entre 2 e 3	635:13:54	560:38:40	567:01:50
	Entre 3 e 4	16:05:03	15:04:05	15:07:00
	Entre 4 e 5	7:04:40	5:45:03	5:45:03
MÁQUINA 16	Entre 5 e 6	1994:55:08	1622:36:49	1655:56:43
	Entre 6 e 7	59:13:46	54:00:38	54:08:13
	Entre 7 e 8	246:56:29	216:09:58	219:40:41
	Entre 8 e 9	466:31:51	419:42:45	421:44:04
	Entre 9 e 10	1431:58:57	1277:35:49	1345:03:22
	Entre 10 e 11	1790:29:04	1638:57:55	1648:38:20
	Entre 1 e 2	3228:06:57	2633:54:55	2734:16:24
	Entre 2 e 3	0:26:49	0:24:04	0:26:49
MÁQUINA 17	Entre 3 e 4	0:02:46	0:00:04	0:02:46
	Entre 4 e 5	2903:27:53	2339:02:54	2370:17:08
	Entre 5 e 6	899:52:26	800:21:42	809:57:15
	Entre 6 e 7	0:35:46	0:31:06	0:31:58
	Entre 7 e 8	917:09:51	861:47:07	862:34:49
	Entre 8 e 9	193:44:57	172:39:17	174:13:42
	Entre 9 e 10	384:22:39	368:47:14	368:58:18
	Entre 10 e 11	1038:40:34	982:21:16	983:43:15
MÁQUINA 18	Entre 11 e 12	763:08:18	684:21:04	686:20:14
	Entre 1 e 2	6083:57:52	5199:08:43	5281:11:07
	Entre 2 e 3	2:20:50	2:16:05	2:20:50
	Entre 3 e 4	1:41:39	1:40:46	1:41:39
	Entre 4 e 5	1109:18:42	1034:24:13	1037:44:29
MÁQUINA 18	Entre 5 e 6	360:27:39	310:57:41	313:51:19
	Entre 1 e 2	477:53:48	435:09:38	436:24:10
	Entre 2 e 3	3096:55:53	2747:32:18	2781:49:51
	Entre 3 e 4	229:36:31	198:01:38	219:41:13
	Entre 4 e 5	2:40:17	2:39:31	2:40:17
	Entre 5 e 6	1512:16:59	1444:34:15	1450:30:13
	Entre 6 e 7	956:48:43	877:30:26	882:14:23
	Entre 7 e 8	10:49:38	10:44:24	10:49:38
	Entre 8 e 9	61:24:01	59:59:07	60:11:34
	Entre 9 e 10	0:10:43	0:09:56	0:10:43
MÁQUINA 18	Entre 10 e 11	5225:01:14	4913:08:26	4950:39:17
	Entre 1 e 2	7037:41:27	6157:13:13	6279:57:03

	Entre 2 e 3	1202:38:18	1184:32:14	1187:24:07
	Entre 3 e 4	1277:23:33	1255:39:31	1256:30:16
	Entre 4 e 5	62:10:29	56:37:25	61:13:20
	Entre 5 e 6	0:03:43	0:03:09	0:03:43
	Entre 6 e 7	0:03:17	0:02:45	0:03:17
MÁQUINA 20	Entre 1 e 2	0:25:39	0:10:43	0:25:39
	Entre 2 e 3	1063:37:54	1039:54:20	1048:51:27
	Entre 3 e 4	1476:18:08	1440:49:25	1443:19:08
	Entre 4 e 5	5225:01:10	4938:23:43	4963:47:07
MÁQUINA 21	Entre 1 e 2	7037:35:56	6306:00:15	6399:42:37
	Entre 2 e 3	1:38:59	1:37:08	1:38:59
	Entre 3 e 4	971:33:21	936:54:21	938:10:17
	Entre 4 e 5	1567:59:10	1543:01:45	1546:24:37
	Entre 5 e 6	1173:56:15	1123:58:06	1125:56:54

Anexo G – Tabela para estimação dos parâmetros de fiabilidade do sistema de controlo de potência (responsável pelo Estado E11)

<i>Tempo (em dias) entre ocorrências do estado E11, exceto os tempos nos estados E2, E4, E5, E6, E7, E9, E10, E12 e E14</i>	
1,137	5,885
1,234	6,054
1,421	6,375
1,422	6,394
1,431	6,517
1,471	6,531
1,525	7,065
1,541	7,196
1,587	7,202
1,624	8,051
1,703	8,199
1,892	8,658
1,927	8,851
1,942	9,196
1,957	9,836
2,047	10,076
2,317	10,528
2,348	10,592
2,394	11,157
2,495	11,560
2,609	11,687
2,731	11,939
2,760	12,060
3,034	12,253
3,051	12,514
3,063	12,884
3,228	13,121
3,237	13,463
3,335	13,781
3,350	14,086
3,378	14,666
3,425	14,787
3,427	14,972
3,495	15,249
3,561	15,908
3,664	16,830
3,833	17,053
4,016	17,225
4,079	17,320
4,184	17,637
4,308	18,934
4,316	19,193
4,465	19,569
4,737	20,389
4,791	21,116
5,094	21,204
5,197	21,731
5,226	21,858
5,270	22,022

5,458	99,517
5,532	22,602
5,745	99,959
23,087	100,294
23,132	106,453
23,230	108,681
24,364	
24,536	
24,836	
24,927	
25,071	
26,188	
26,795	
27,478	
28,305	
29,159	
30,097	
30,872	
31,531	
31,910	
31,976	
32,239	
32,828	
34,946	
38,340	
42,145	
46,293	
46,356	
47,248	
47,563	
50,998	
51,222	
54,368	
56,421	
56,908	
57,045	
60,173	
61,017	
67,023	
73,891	
75,446	
77,030	
78,875	
80,172	
81,147	
83,055	
84,044	
84,858	
85,133	
86,518	
87,680	
90,672	
91,288	
91,666	
92,818	
94,050	
96,574	
99,100	

Anexo H – Tabela para estimação dos parâmetros de fiabilidade do sistema de controlo de carga nas pás (responsável pelo Estado E9)

Tempo (em dias) entre ocorrências do estado E9, exceto os tempos nos estados E2, E4, E5, E6, E7, E10, E11, E12 e E14

2,509	115,910
2,962	117,061
4,019	124,507
4,316	125,864
4,332	146,444
4,693	150,300
4,726	152,948
5,739	201,723
5,779	114,868
5,884	
6,492	
7,260	
9,153	
9,154	
12,599	
14,215	
14,563	
15,510	
17,408	
17,572	
18,183	
19,284	
19,826	
21,683	
22,018	
23,626	
27,777	
29,808	
32,179	
32,427	
32,995	
33,748	
34,938	
35,941	
39,090	
39,626	
43,239	
43,702	
61,304	
63,733	
68,998	
87,085	
91,030	
98,762	
110,660	
112,052	
113,928	
114,311	
