



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Análise de Fiabilidade de Grupos Geradores em Aproveitamentos Hídricos**

**JOÃO PAULO DE BRITO NEVES ROCHETA CASSIANO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia da Manutenção

Orientador(es):

Doutor José Augusto da Silva Sobral  
Eng.º Joaquim Jorge Santos Silva

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado  
Vogais: Doutor Luís António Andrade Ferreira  
Doutor José Augusto da Silva Sobral

**Outubro de 2017**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Análise de Fiabilidade de Grupos Geradores em Aproveitamentos Hídricos**

**JOÃO PAULO DE BRITO NEVES ROCHETA CASSIANO**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia da Manutenção

Orientador(es):

Doutor José Augusto da Silva Sobral  
Eng.º Joaquim Jorge Santos Silva

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado  
Vogais: Doutor Luís António Andrade Ferreira  
Doutor José Augusto da Silva Sobral

**Outubro de 2017**



## **Agradecimentos**

Ao Doutor José Sobral, um profundo agradecimento por ter sido incansável, não só no apoio a este Trabalho Final de Mestrado, mas também na transmissão de conselhos, valores e de uma enorme amizade ao longo do meu percurso nesta instituição.

À empresa EDP Produção, em especial ao Eng.º Joaquim Jorge Santos Silva por me ter recebido de braços abertos, sempre com enorme simpatia e colaboração, disponibilizando tempo, conhecimentos e material imprescindível à realização deste Trabalho Final de Mestrado.

Ao meu tio e amigo Eng.º João Cassiano por todo o seu apoio e companheirismo.

A toda a minha família e amigos pelo seu apoio incansável e indispensável.



## **Glossário/ Lista de Acrónimos/ Lista de Siglas**

DOM – Direção de Otimização e Manutenção

EDP – Energias De Portugal

EDPP – EDP Produção (empresa do grupo EDP)

EN – Norma Europeia

FMEA – Failure Mode and Effect Analysis

FMECA – Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

FTA – Fault Tree Analysis

IAM – Institute of Asstet Management

IBM – International Business Machines

ISO – International Standard Organisation

MC – Manutenção Corretiva

MPP – Manutenção Preventiva Preditiva

MPS – Manutenção Preventiva Sistemática

MTBF – Mean Time Between Failures

MTTF – Mean Time To Failure

MTTFF - Mean Time To First Failure

NP – Norma Portuguesa

PAS 55 – Publicity Available Specification 55

RBM – Risk Based Maintenance

RCM – Realiability Centered Maintenance

TPM – Total Productive Maintenance

TTF – Time To Failure

UNSCC – United Nations Standards Coordinating Comité



## Resumo

Com o constante agravamento das exigências do mercado da energia elétrica e das legislações referentes a questões de segurança e ambiente, que são impostas às empresas que dependem diretamente da produção de energia como meio de geração de capital, torna-se indispensável um olhar atento sobre o controlo, gestão e maximização do retorno associado ao ciclo de vida dos ativos físicos. Assim, os princípios fundamentais de gestão de ativos, introduzidos pela PAS 55 e recentemente normalizados pela série de normas ISO 5500X, tornam-se indispensáveis para o aumento ou manutenção da competitividade destas empresas.

A manutenção industrial é uma componente chave do processo de gestão de ativos físicos. Esta deve ser vista como um investimento gerador de um retorno a longo prazo, conseguido através da garantia de melhorias no rendimento dos equipamentos bem como o aumento do seu ciclo de vida e disponibilidade. Ao longo dos anos, novos conceitos, metodologias e técnicas têm emergido no sentido de a tornar cada vez mais eficaz e otimizada, posicionando-se o estudo da Fiabilidade entre os mais relevantes.

A Fiabilidade é uma área científica que visa conhecer o comportamento de vida de produtos, equipamentos e sistemas de forma a assegurar que estes executem a sua função, sem falhar, por um período de tempo e em condições de operação específicas. Esta é bastante flexível e permite que se desenvolvam estratégias bastante promissoras e que poderão fazer toda a diferença na incessante procura pela maximização da disponibilidade e minimização de custos manutenção.

O estudo prático apresentado, desenvolvido no decorrer de um estágio realizado no Departamento de Fiabilidade e Planeamento da Direção de Otimização e Manutenção da EDP Produção, tem o objetivo de desenvolver e aplicar um procedimento com vista à determinação de um plano de manutenção preditiva de uma turbina hidráulica *Francis* de eixo vertical com recurso à análise de fiabilidade apoiada nos dados presentes no seu histórico de ocorrências. Com vista à mitigação de futuras falhas neste equipamento e conseqüente melhoria da sua fiabilidade, paralelamente a todo o processo de análise de fiabilidade, é realizada uma análise aos modos de falha verificados.

### Palavras chave:

Gestão de Ativos Físicos; Manutenção Industrial; Otimização; Fiabilidade; Manutenção Preditiva.



## **Abstract**

With the constant increase in the requirements of the electric energy market and the legislations on safety and environmental issues that are imposed on companies that depend directly on energy production as a means of generating capital, a close look at the control, management and maximization of the return associated with the life cycle of physical assets is imperative. Thus, the fundamental principles of asset management, introduced by PAS 55 and recently standardized by the ISO 5500X series, are indispensable for increasing or maintaining the competitiveness of these companies.

Industrial maintenance is a key component of the physical asset management process. This should be seen as an investment that generates a long-term return, achieved by guaranteeing improvements in equipment performance as well as increasing its life cycle and availability. Over the years, new concepts, methodologies and techniques have emerged in the sense of making it increasingly more effective and optimized, positioning Reliability among the most relevant.

Reliability is a scientific area that aims to know the life behavior of products, equipment and systems in order to ensure that they perform their function, without fail, for a period of time and under specific operating conditions. This is very flexible and allows for the development of very promising maintenance strategies that can make all the difference in the never-ending search for maximizing availability and minimizing costs.

The practical study presented, developed during an internship carried out in the Department of Reliability and Planning of the Optimization and Maintenance Direction of EDP Produção, has the objective of applying the reliability analysis in the design of a predictive maintenance plan of a vertical axis Francis hydraulic turbine using the recorded data in its history of occurrences. In order to mitigate future failures in this equipment and consequent improvement of their reliability, in parallel to the entire process of reliability analysis, a analysis of the failure modes is performed.

### **Keywords:**

Management of Physical Assets; Industrial Maintenance; Optimization; Reliability; Predictive Maintenance.



# Índice

Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo do Trabalho .....	1
1.3. Estrutura do Trabalho.....	2
Capítulo 2 – Gestão de Ativos e a Manutenção .....	3
2.1. Gestão de Ativos.....	3
2.1.2. A Série ISO 5500X.....	3
2.1.2. Definição de Ativo.....	5
2.1.3. Definição de Gestão de Ativos .....	6
2.1.4. Evolução da Gestão de Ativos .....	7
2.1.5. Necessidade da Gestão de Ativos.....	8
2.2. Manutenção .....	10
2.2.1. Definição de Manutenção.....	11
2.2.2. Objetivo e Importância da Manutenção .....	12
2.2.3. Evolução da Manutenção.....	13
2.2.4. Tipos de Manutenção.....	16
2.2.4.1. Manutenção Corretiva .....	17
2.2.4.2. Manutenção Preventiva Sistemática .....	17
2.2.4.3. Manutenção Preventiva Preditiva.....	18
2.3. Adequação da Estratégia de Manutenção aos Requisitos do Presente .....	20
Capítulo 3 – Fiabilidade e o RCM.....	23
3.1. Introdução à Fiabilidade e Respetivas Ferramentas.....	23
3.1.1. Definição e Conceito de Fiabilidade .....	23
3.1.2. Tipos e Causas de Falha .....	24
3.1.3. Requisitos e Etapas da Fiabilidade .....	25
3.1.4. Análise de Risco de Falha (Hazard Analysis) .....	26
3.1.5. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) .....	27
3.1.6. Análise de Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis) .....	28
3.2. Medição Empírica e Cálculo da Fiabilidade .....	29
3.3. Curva da Banheira .....	33
3.4. Distribuições de Probabilidade .....	35
3.4.1. <i>Weibull</i> Bi-paramétrica e Tri-paramétrica.....	35
3.4.2. Exponencial Negativa .....	40
3.4.3. Normal.....	41
3.4.4. Lognormal .....	42
3.5. Fiabilidade de Sistemas .....	44
3.5.1. Sistema de Componentes em Série .....	44
3.5.2. Sistema de Componentes em Paralelo .....	46

3.5.3. Sistema Combinado.....	47
3.5.4. Sistema de Componentes em paralelo restrito .....	47
3.5.5. Sistema de Componentes em Standby .....	48
3.6. RCM - Manutenção Centrada na Fiabilidade .....	49
3.7.1. Princípios do RCM.....	51
3.7.2. Procedimento do RCM.....	52
3.7.3. Vantagens e Limitações do RCM .....	54
Capítulo 4 - Estudo Prático .....	55
4.1. Introdução e Estrutura do Estudo Prático.....	55
4.2. A Central Hidroelétrica EDP .....	57
4.3. Turbina hidráulica <i>Francis</i> de eixo vertical .....	59
4.4. Análise de criticidade às posições funcionais.....	68
4.5. Análise de Fiabilidade aos Subsistemas – Procedimento.....	69
4.5.1. Resultados da Análise de Fiabilidade aos Subsistemas .....	75
4.5.1.1. Resultados da Análise ao Subsistema 1 – “Rotor”.....	75
4.5.1.2. Resultados da Análise no Subsistema 2 – Junta de Estanqueidade .....	77
4.5.1.3. Resultados da Análise ao Subsistema 3 – Linha de Veios .....	79
4.5.1.4. Resultados da Análise ao Subsistema 4 – Chumaceira Guia .....	81
4.5.1.5. Resultados da Análise ao Subsistema 5 – Sistema de Refrigeração da Chumaceira Guia.....	84
4.5.1.6. Resultados da Análise ao Subsistema 6 – Chumaceira de Impulso.....	86
4.5.1.7. Resultados da Análise ao Subsistema 7 – Sistema de Refrigeração da Chumaceira de Impulso .....	88
4.5.1.8. Resultados da Análise ao Subsistema 8 – Distribuidor.....	90
4.5.1.9. Resultados da Análise ao Subsistema 9 – Sistema de Acionamento do Distribuidor.....	93
4.5.1.10. Análise aos Modos de Falha.....	95
4.6. Programação das Intervenções Preventivas .....	97
4.6.1. Definição de Blocos de Intervenções Preventivas .....	97
4.6.2. Definição das Ações de Inspeção/Manutenção Preventiva .....	98
4.5.2.1. Bloco A.....	98
4.5.2.3. Bloco B.....	100
4.5.2.3. Bloco C .....	101
4.5.2.4. Bloco D .....	102
Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros .....	103
5.1. Conclusões .....	103
5.2. Trabalhos Futuros .....	105
Referências.....	107
Anexos .....	111

## Índice de Figuras

Figura 1- Tipos de ativos físicos.....	6
Figura 2- Evolução da gestão de ativos (IBM 2007).....	9
Figura 3 - O equilíbrio entre os fatores "Custos", "Desempenho" e "Risco como objetivo da gestão de ativos (retirado da documentação interna da empresa EDP Produção) .....	10
Figura 4 - Fatores que influenciam a importância da manutenção.....	14
Figura 5 - Mudança no paradigma da gestão da manutenção.....	15
Figura 6 - Tipos de manutenção.....	16
Figura 7 - Procedimento de gestão da manutenção (Mitchell, 2002).....	21
Figura 8 - Os vários tipos de manutenção na sua relação com a disponibilidade e custos (Retirado da documentação interna da EDP Produção).....	21
Figura 9- Requisitos e objetivos da fiabilidade - equilíbrio de fatores (Carinhas, H.P. 2009). ....	26
Figura 10 - Simbologia utilizada em árvores de falhas. ....	29
Figura 11 - Exemplo de árvore de falhas (adaptado de Assis, 2010).....	30
Figura 12 - Fiabilidade vs Probabilidade de falha ao longo do tempo. ....	31
Figura 13 – Evolução da taxa de falhas ao longo do tempo ou "curva da banheira". ....	33
Figura 14 - Efeito da variação do parâmetro de forma na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014). ....	37
Figura 15 - Efeito da variação do parâmetro de forma na taxa de falhas (Reliasoft, 2014) .....	38
Figura 16 - Efeito da variação do parâmetro de forma na função de fiabilidade (Reliasoft, 2014). ....	39
Figura 17 - Efeito da variação do parâmetro de escala na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014). ....	39
Figura 18 - Efeito da variação do parâmetro de localização na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014). ....	40
Figura 19 - Efeito da taxa média de falhas na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).....	41
Figura 20 - Efeito da variação do desvio padrão na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).....	42
Figura 21 - Efeito da variação do desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores de TTF na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014) .....	43
Figura 22 - Efeito da variação da média logarítmica na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014) .....	44
Figura 23 – Diagrama de blocos de um sistema de três componentes em série. ....	45
Figura 24 - Diagrama de blocos de um sistema de três componentes em paralelo. ....	46
Figura 25 - Diagrama de blocos de sistema de n componentes em paralelo restrito. ....	48
Figura 26 - Diagrama de blocos de um sistema de n componentes em standby. ....	49
Figura 27 - Representação do corte transversal de um grupo gerador hídrico.....	59
Figura 28 - Fluxo hidráulico numa turbina Francis de eixo vertical. ....	60
Figura 29 - Rotor de uma turbina hidráulica Francis.....	61

Figura 30 - Chumaceira guia da turbina em estudo. ....	64
Figura 31 - Representação do distribuidor de uma turbina <i>Francis</i> .....	67
Figura 32 - Representação do corte transversal de uma turbina <i>Francis</i> e identificação dos respetivos subsistemas. ....	68
Figura 33 - Seleção da opção de análise de vida útil com dados censurados à direita no <i>software Weibull ++7</i> .....	70
Figura 34 - Inserção de dados de vida útil no <i>software Weibull ++7</i> .....	70
Figura 35 - Seleção do método MLE no <i>software Weibull ++ 7</i> . ....	71
Figura 36 - Utilização da ferramenta <i>Distribution Wizard</i> no <i>software Weibull ++ 7</i> . ....	71
Figura 37 - Utilização da ferramenta <i>Calculate</i> no <i>software Weibull ++7</i> . ....	72
Figura 38 - Utilização da ferramenta <i>Quick Calculation Pad</i> no <i>software Weibull ++ 7</i> . ....	73
Figura 39 - Utilização da ferramenta <i>Confidence Bounds</i> no <i>software Weibull ++ 7</i> . ....	74
Figura 40 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação (em horas) com intervalo de confiança unilateral inferior de 90%.....	74
Figura 41 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 1.....	77
Figura 42 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 2.....	79
Figura 43 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 3.....	81
Figura 44 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 4.....	84
Figura 45 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 5.....	86
Figura 46 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 6.....	88
Figura 47 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 7.....	90
Figura 48 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 8.....	92
Figura 49 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 9.....	94
Figura 50 - Intervalos de atuação preventiva nos subsistemas. ....	97

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens da manutenção corretiva. ....	18
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da manutenção preventiva sistemática. ....	19
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens da Manutenção Preventiva Preditiva.....	20
Tabela 4 - Otimização da estratégia de manutenção (Marquéz et. al., 2009) .....	22
Tabela 5 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 1. ....	61
Tabela 6 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 2. ....	62
Tabela 7 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 3. ....	63
Tabela 8 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 4. ....	63
Tabela 9 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 5. ....	64
Tabela 10 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 6. ....	65
Tabela 11 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 7. ....	66
Tabela 12 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 8. ....	66
Tabela 13 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 9 .....	67
Tabela 14 - Histórico de falhas do subsistema 1.....	75
Tabela 15 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 1. ....	76
Tabela 16 - Resultados da análise de fiabilidade ao subsistema 1.....	76
Tabela 17 - Histórico de falhas do subsistema 2.....	77
Tabela 18 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 2. ....	78
Tabela 19 - Resultados da análise ao subsistema 2. ....	78
Tabela 20 - Histórico de falhas do subsistema 3.....	80
Tabela 21 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 3. ....	80
Tabela 22 - Resultados da análise ao subsistema 3. ....	80
Tabela 23 - Histórico de falhas do subsistema 4.....	82
Tabela 24 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 4. ....	82
Tabela 25 - Resultados da análise ao subsistema 4.....	83
Tabela 26 - Histórico de falhas do subsistema 5.....	84
Tabela 27 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 5. ....	85
Tabela 28- Resultados da análise ao subsistema 5. ....	85
Tabela 29 - Histórico de falhas do subsistema 6.....	87
Tabela 30 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 6. ....	87
Tabela 31 - Resultados da análise ao subsistema 6. ....	87
Tabela 32 - Histórico de falhas do subsistema 7.....	89
Tabela 33 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 7. ....	89
Tabela 34 - Resultados da análise ao subsistema 7. ....	89
Tabela 35 - Histórico de falhas do subsistema 8.....	91
Tabela 36 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 8. ....	91
Tabela 37 - Resultados da análise ao subsistema 8. ....	92
Tabela 38 - Histórico de falhas do subsistema 9.....	93
Tabela 39 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 9. ....	93

Tabela 40 - Resultados da análise ao subsistema 9. ....	94
Tabela 41 - Definição de blocos de intervenções preventivas. ....	98

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1. Enquadramento

Cada vez mais, com o constante agravamento das exigências do mercado, as empresas de produção e distribuição de energia elétrica procuram soluções para se manterem competitivas. Sendo estas detentoras de um grande número de ativos físicos, dos quais depende diretamente a sua receita, a gestão consciente do ciclo de vida e a procura pela maximização da disponibilidade operacional dos mesmos torna-se imperativa, elevando assim a importância da área da manutenção.

As estratégias de manutenção mais recentes têm origem não só na engenharia da manutenção, mas também nos paradigmas de gestão de ativos físicos, introduzidos pela PAS 55 e recentemente normalizados pela série ISO 5500x, pelo que já não faz sentido abordar a temática da manutenção sem a complementar com estes. Uma estratégia direcionada para a minimização de custos derivados da indisponibilidade e ações de manutenção não programadas constitui então um dos principais focos das empresas e novas metodologias têm sido desenvolvidas, nomeadamente através da introdução de conceitos como a Fiabilidade.

A Fiabilidade é uma área científica que visa conhecer o comportamento de vida de produtos, equipamentos e sistemas de forma a assegurar que estes executem a sua função, sem falhar, por um período de tempo e em condições de operação específicas. Esta é bastante flexível e permite que se desenvolvam estratégias de manutenção bastante promissoras e que poderão fazer toda a diferença no posicionamento das empresas no mercado.

## 1.2. Objetivo do Trabalho

A realização deste trabalho, efetuado no decorrer de um estágio curricular no Departamento de Fiabilidade e Planeamento da Direção de Otimização e Manutenção da EDP Produção, tem, numa primeira abordagem, a finalidade de aprofundar conhecimentos acerca dos mais recentes conceitos, metodologias e ferramentas, desenvolvidos no sentido da otimização da estratégia de manutenção, nomeadamente a introdução dos novos paradigmas de gestão de ativos e a análise de fiabilidade.

Numa segunda abordagem, de modo a materializar todo o conhecimento referido anteriormente, é proposto o desenvolvimento de uma metodologia, assente na análise de fiabilidade, com vista à definição do plano de manutenção de uma Turbina *Francis* de eixo

vertical, pertencente a uma das mais importantes centrais hidroelétricas do Grupo EDP. Com o desenvolvimento deste caso prático pretende-se demonstrar a aplicação do conceito de fiabilidade na gestão da manutenção industrial, salientando os seus benefícios para a atividade das empresas.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Para consecução do objetivo proposto, este Trabalho Final de Mestrado encontra-se dividido em cinco capítulos, que podem ser descritos da seguinte forma:

- O Capítulo 1, o presente capítulo, constitui a introdução ao trabalho e está subdividido em enquadramento do tema, objetivo do trabalho e estrutura do trabalho.
- O Capítulo 2 faz um levantamento teórico acerca das áreas da gestão de ativos e da manutenção salientando a sua forte relação e interdependência.
- O Capítulo 3 contem os fundamentos teóricos acerca da área da fiabilidade e da metodologia RCM, passando pelos seus conceitos, ferramentas e métodos de cálculo e medição empírica.
- O Capítulo 4 é inteiramente dedicado ao desenvolvimento de um estudo prático que visa determinação de um plano de manutenção preventiva, assente na análise de fiabilidade, de uma turbina *Francis* de eixo vertical pertencente a uma das mais importantes centrais hidroelétricas do grupo EDP. Aqui é possível visualizar a aplicação prática dos fundamentos teóricos apresentados, bem como os seus benefícios.
- O Capítulo 5 contem as principais conclusões do trabalho desenvolvido bem como as propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2 – Gestão de Ativos e a Manutenção

## 2.1. Gestão de Ativos

Com o constante aumento das exigências do mercado e das legislações referentes a questões de segurança e ambiente, que são impostas às organizações que dependem diretamente da produção como meio de geração de capital, torna-se indispensável um olhar atento sobre o controlo, gestão e maximização do retorno associado ao ciclo de vida dos ativos. O equilíbrio entre fatores como o custo, desempenho e risco representa o grande objetivo desta área.

Os princípios fundamentais de gestão de ativos físicos, introduzidos pela série de normas ISO 5500x, são essenciais não só para a certificação das organizações na área de gestão de ativos, mas fundamentalmente para garantir uma gestão otimizada dos mesmos. A busca incessante pela maximização da disponibilidade dos equipamentos e minimização de custos de manutenção tem apresentado uma evolução bastante positiva, quanto aos seus resultados, ao longo da história. A mudança e aperfeiçoamento da estratégia de manutenção de equipamentos tem sido constante e cabe às organizações a adoção de uma atitude proactiva neste aspeto.

### 2.1.2. A Série ISO 5500X

As séries de normas ISO foram criadas pela Organização Internacional de normalização (ISO), com o objetivo de melhorar a qualidade de produtos e serviços. A ISO é uma das principais organizações a desenvolver normas do mundo, e foi criada a partir da união da *International Federation of the National Standardizing Associations (ISA)* e a *United Nations Standards Coordinating Committee (UNSCC)*, tendo iniciado funções oficialmente no ano de 1947.

Em 2004, já preocupados com a gestão de ativos industriais, os Ingleses lançaram a especificação PAS 55, que não se trata de uma norma, mas sim de uma especificação de diretrizes e requisitos para boas práticas de gestão de ativos. Havia então uma necessidade de normalizar esta questão.

Em 2008, uma revisão da PAS 55 é realizada na ocasião do 4º Congresso Mundial de Manutenção, na China, onde também surge a ideia de criar um Fórum Global voltado para a Gestão de Ativos. Com diversas federações e associações participantes representando todos os continentes, é fundado o Fórum Internacional de Gestão de Ativos em março de 2009. A

partir da criação deste fórum, surge a ideia de se criar uma norma internacional que aborda especificamente o Sistema de Gestão de Ativos. Foi criado então o comitê técnico de gestão de ativos e a série passou então a ser elaborada (Amendola, 2014).

A série ISO 5500X é constituída por três normas: A norma **ISO 55000** que faz uma abordagem geral da gestão de ativos, incidindo nos seus princípios e terminologias base; A norma **ISO 55001** que trata dos requisitos para a certificação das organizações em gestão de ativos; A norma **ISO 55002** que determina as diretrizes para a aplicação da norma ISO 55001 onde o foco está na metodologia de implementação dos conceitos de gestão de ativos às diversas organizações. Esta série pode ser estendida a qualquer tipo de organização seja da área industrial seja comercial (Wagner, 2014).

Organizações que pretendam não só uma certificação em gestão de ativos, mas também otimizar a gestão do ciclo de vida dos seus ativos físicos devem procurar o cumprimento de todas as metodologias e requisitos descritos pela série ISO 55000 que, ao nível da manutenção, passa por adequar a sua estratégia de gestão introduzindo os conceitos emergentes (e.g. fiabilidade e risco).

A aplicação de uma gestão de ativos físicos baseada nas diretrizes desta série ISO representa inúmeros benefícios, tais como:

- **Melhor desempenho financeiro:** melhoria do retorno dos investimentos e redução dos custos a longo prazo.
- **Decisões de investimento baseadas no estado de condição atual dos ativos:** melhoria na tomada de decisão e equilíbrio entre custos, riscos, oportunidade e desempenho.
- **Gestão do risco:** minimização de perdas financeiras e impacto ambiental e social; melhorias ao nível da saúde e segurança.
- **Melhor serviço e resultados.**
- **Responsabilidade social demonstrada:** melhoria na capacidade da organização de, por exemplo, reduzir emissões e demonstrar práticas empresariais responsáveis e éticas.
- **Conformidade com os requisitos legais.**
- **Melhor reputação:** maior satisfação por parte dos clientes.
- **Maior sustentabilidade:** Gestão eficaz de efeitos a curto e longo prazo.
- **Maior eficiência e eficácia.**

## 2.1.2. Definição de Ativo

O termo “ativo” é bastante utilizado na sociedade atual, apresentando diferentes significados dependendo da área ou setor em causa.

Segundo a norma ISO 55000 (2014), *“um ativo é um item, coisa ou entidade que tem valor potencial ou real para uma organização. O valor dos ativos varia consoante as organizações e suas partes interessadas e podem ser tangíveis ou intangíveis, financeiros ou não-financeiros”*.

O grupo EDP tem a sua própria definição de ativo como sendo *“conjunto de bens e direitos necessários para a manutenção, sustentada das atividades e conseqüentemente do negócio, podendo identificar-se, quer pela sua materialidade, quer pelo tempo em que permanecem na posse da organização”*.

Os ativos em meio empresarial podem dividir-se em cinco tipos:

- **Ativos físicos** (veículos, edifícios, máquinas, instalações, etc...);
- **Ativos financeiros** (lucro, capital financeiro, ações, dívidas, etc..);
- **Ativos humanos** (conhecimento, responsabilidades, experiência, etc...);
- **Ativos intangíveis** (reputação, moral, imagem, relações externas, etc...);
- **Ativos de informação** (dados e informação empresarial das mais diversas áreas).

Uma vez que com esta dissertação se pretende incidir sobre a área da manutenção industrial, só irá ser abordado um tipo de ativo – **Os ativos físicos**.

A *Publicly Available Specification 55* (PAS 55, 2008) foi o primeiro documento a ser criado com vista a oferecer diretrizes e boas práticas para a gestão de ativos físicos, de forma a criar uma estrutura funcional que permite a melhoria contínua do sistema de gestão de ativos de uma organização. Esta define ativos físicos como *“instalações, máquinas, imóveis, edifícios, veículos ou outros itens que apresentem valor distinto para a organização”* e afirma que estes se podem subdividir em ativos físicos simples ou complexos dependendo da sua interligação e dependência funcional de outros ativos. Os ativos simples não têm qualquer tipo de dependência funcional de outros ativos, e.g. disjuntores. Já os ativos complexos necessitam do bom funcionamento de outros ativos para garantirem a sua função, e.g. o alternador depende do bom funcionamento do elemento que induz rotação no rotor.

A figura 1 demonstra a interação entre os dois tipos de ativos.

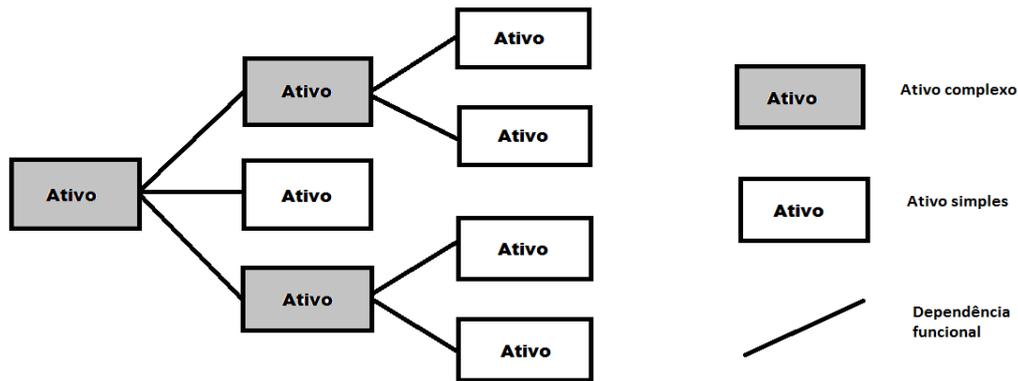


Figura 1- Tipos de ativos físicos

### 2.1.3. Definição de Gestão de Ativos

Shahidehpour & Ferrero (2005) afirmam que *“a gestão de ativos pode ser definida como um processo de maximização do retorno do investimento de um equipamento, através da maximização do desempenho e minimização do custo total do ciclo de vida do equipamento”*.

Para a IBM (2007) a gestão de ativos é definida pela *“aquisição, utilização, manutenção, modificação e eliminação de ativos e propriedades essenciais”* referindo que esta é vital para o sucesso da maioria das empresas e que quanto maior for a importância, em termos de capital, dos ativos físicos mais o desempenho e sucesso do negócio da empresa estará apoiado na implantação, disponibilidade e manutenção dos ativos.

Segundo Hastings (2010) *“dado um negócio ou objetivo organizacional, a gestão de ativos, é o conjunto de atividades associadas no sentido de: identificar quais os ativos necessários; identificar as necessidades de financiamento; adquirir os ativos; O fornecimento de apoio logístico e de manutenção a sistemas de ativos; A eliminação ou renovação dos ativos; de modo a satisfazer de forma eficaz e eficiente o objetivo desejado.”*

Davies, Dieter & McGrail (2011) defendem que a gestão de ativos é uma expressão que tem vindo a ser cada vez mais utilizada nas organizações, podendo a mesma apresentar significados diferentes, dependendo do país ou setor onde é empregue. Numa pesquisa debruçada sobre esta área é possível verificar que existe maior quantidade de informação para a aplicação de gestão de ativos na área financeira. No entanto é também possível encontrar alguma informação relativa à sua aplicação nas áreas da engenharia e manutenção de ativos físicos.

A especificação PAS 55 (2008) define gestão de ativos físicos como “*atividades sistemáticas e coordenadas através das quais a organização efetua uma gestão ótima e sustentável dos ativos e sistemas de ativos, do seu desempenho, risco e custos ao longo do seu ciclo de vida por forma a atingir o plano estratégico proposto*”.

A definição adotada pela EDP Produção, bem como para a realização deste estudo é a que está presente na série ISO 5500X. Segundo a ISO 55000, “*Gestão de ativos são todas as ações coordenadas com vista a valorizar o ciclo de vida dos ativos*” e a implementação de um sistema de gestão de ativos, em qualquer organização, está apoiada nos seguintes fundamentos:

- **Valor:** A gestão de ativos não se concentra no próprio ativo, mas no valor que este pode gerar.
- **Alinhamento:** A gestão de ativos traduz os objetivos em decisões técnicas e financeiras, planos e atividades.
- **Liderança:** a liderança e o compromisso de todos os níveis da empresa são essenciais para estabelecer, operar e melhorar a gestão de ativos.
- **Garantias:** A implementação de um sistema de gestão de ativos garante que os ativos irão cumprir a sua função. A necessidade de existência de garantias prende-se na necessidade de gerir de forma eficaz uma organização.

#### **2.1.4. Evolução da Gestão de Ativos**

A Gestão de ativos teve as suas primeiras origens nos anos 80 na indústria de exploração e produção de petróleo do Mar do Norte. Naquela altura o custo de produção de petróleo estava próximo dos 15 \$ por barril. Devido à sua abundância no mercado, o seu preço estava muito baixo pelo que houve necessidade de as empresas tomarem medidas para sobreviver. A primeira medida a ser tomada foi a responsabilização de cada unidade produzida bem como da sua lucratividade, resultando numa queda de custos de produção para 6\$ a 7\$ por barril e nalguns casos para 2\$ (Hugget, 2005).

Segundo Mitchell (2002), até aos anos 70 a contenção de custos (especialmente na manutenção dos ativos físicos) era o principal foco das empresas diariamente. Contudo, a evolução acentuada da globalização provocou um acréscimo na competitividade dos mercados e foram os Japoneses que começaram por mobilizar-se no sentido de lançar produtos de alta qualidade a preços reduzidos. Isto resultou numa mudança radical nas indústrias de todo o mundo onde as empresas, com a necessidade de competirem naquelas condições, passaram também a criar estratégias no sentido do aumento da qualidade do produto por preços

reduzidos. Em diversos casos as medidas adotadas tiveram curta duração onde os órgãos de gestão, por exemplo, simplesmente reduziram na mão-de-obra e nos esforços de manutenção dos ativos físicos da organização, originando avarias e paragens na produção que originaram custos muito superiores. Hoje em dia já existe um reconhecimento por parte dos órgãos de gestão da maioria das organizações de que a expectativa de retorno do investimento de recursos numa instalação ou equipamento tem que ser medida a longo prazo. O foco já não está na redução de custos por si só, mas no retorno monetário esperado, resultante do investimento nos ativos físicos da empresa.

Segundo a IBM (2007), gestão de ativos é a evolução natural da operação e monitorização dos ativos pertencentes às empresas, tendo em vista a sua otimização, surgindo assim uma resposta aos novos requisitos da indústria, com o aumento da necessidade da fiabilidade e das garantias de qualidade no fornecimento de serviços e produtos. O aumento da necessidade de otimização da gestão dos ativos é visível no progressivo aumento das exigências.

A figura 2 representa a evolução da gestão de ativos relacionando-a com a evolução do pensamento das empresas. Ao longo das décadas, esta tem vindo a sofrer algumas transformações, começando nos registos em papel, que por muitos era considerado um mal necessário até hoje, onde as organizações olham para os ciclos de vida dos ativos e alinham a gestão de ativos com os seus objetivos estratégicos. Num futuro próximo, é esperada uma integração da tecnologia nos próprios ativos. Tecnologias com a capacidade de autodiagnóstico serão capazes de comunicar o estado dos equipamentos, avarias e métricas de desempenho diretamente para os sistemas de gestão em tempo real. Por exemplo, os veículos poderão comunicar a sua localização e eficiência de combustível e a robótica presente na fábrica será capaz de avaliar a sua saúde relativa (IBM 2007).

### **2.1.5. Necessidade da Gestão de Ativos**

As empresas de produção de energia elétrica apoiam-se no uso intensivo dos seus ativos pelo que, as práticas utilizadas para garantir o correto desempenho das suas funções são fundamentais para atingir as suas metas e sustentabilidade.

É imperativa a revisão constante destas práticas devido ao elevado número de ativos e constante agravamento das restrições financeiras e exigência do mercado. Já não é viável o investimento nos ativos da empresa com vista à minimização do risco, mas sim a introdução de metodologias de avaliação do risco que permite otimizar a inspeção, manutenção ou substituição dos ativos, aumentando o retorno financeiro associado a cada um deles (Davies, Dieter & McGrail, 2011).

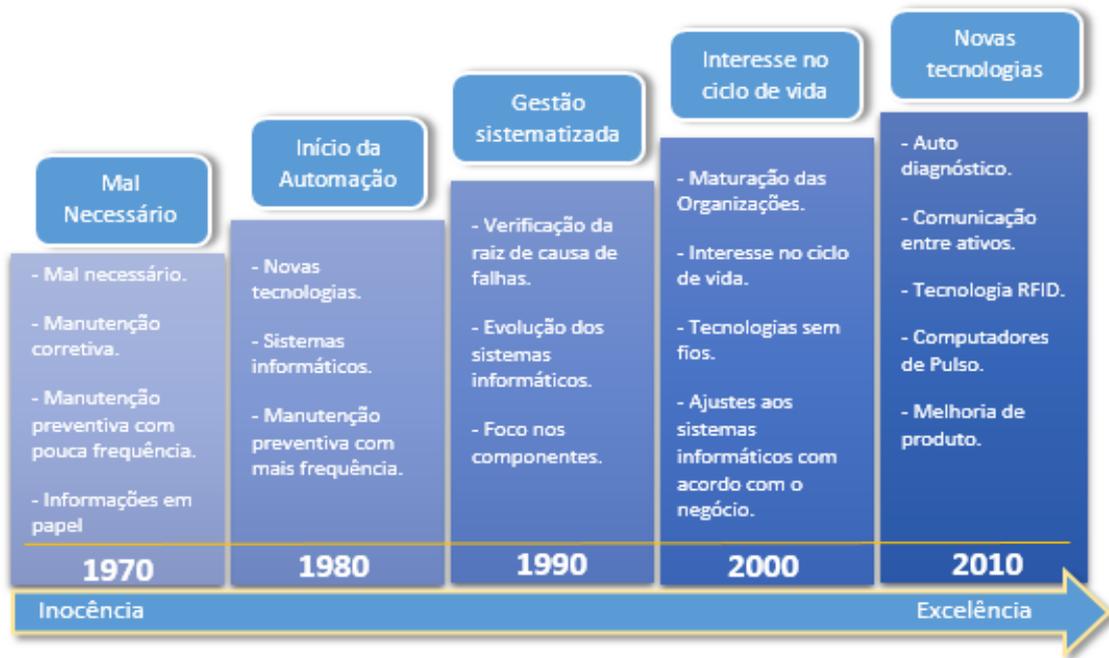


Figura 2- Evolução da gestão de ativos (IBM 2007)

A implementação da gestão de ativos representa vantagens a vários níveis. Ao nível da gestão, esta permite que se desenvolva uma análise mais holística dos processos facilitando a otimização do investimento nos ativos. Ao nível da organização e colaboradores é possível melhorar a organização e a estrutura da empresa para fazer face a novos desafios, providenciar a implementação de procedimentos sistemáticos para melhorar a eficiência, efetuar a transferência das melhores práticas nos vários departamentos, entre outras (Palombo, 2005).

A necessidade da implementação da gestão de ativos não se prende apenas em vantagens nas áreas financeiras e técnicas uma vez que proporciona recompensas como a melhoria na comunicação e colaboração entre os diversos departamentos da empresa, utilização de processos de gestão mais rápidos e menor esforço administrativo (Shahidehpour & Ferrero, 2005).

IBM (2007) chega mesmo a afirmar que a gestão de ativos “*é vital para o sucesso da maioria das empresas e que quanto maior for a importância, em termos de capital, dos ativos físicos mais o desempenho e sucesso do negócio da empresa estará apoiado na implantação, disponibilidade e manutenção dos ativos*”.

Segundo a norma ISO 55000 (2014), “a gestão de ativos permite estabelecer o *balanceamento entre custos, riscos e desempenho dos mesmos em ordem a atingir os objetivos organizacionais*”. O equilíbrio entre estes três fatores é considerado pela EDP Produção um

princípio fundamental da gestão dos seus ativos físicos e encontra-se representado na figura seguinte.

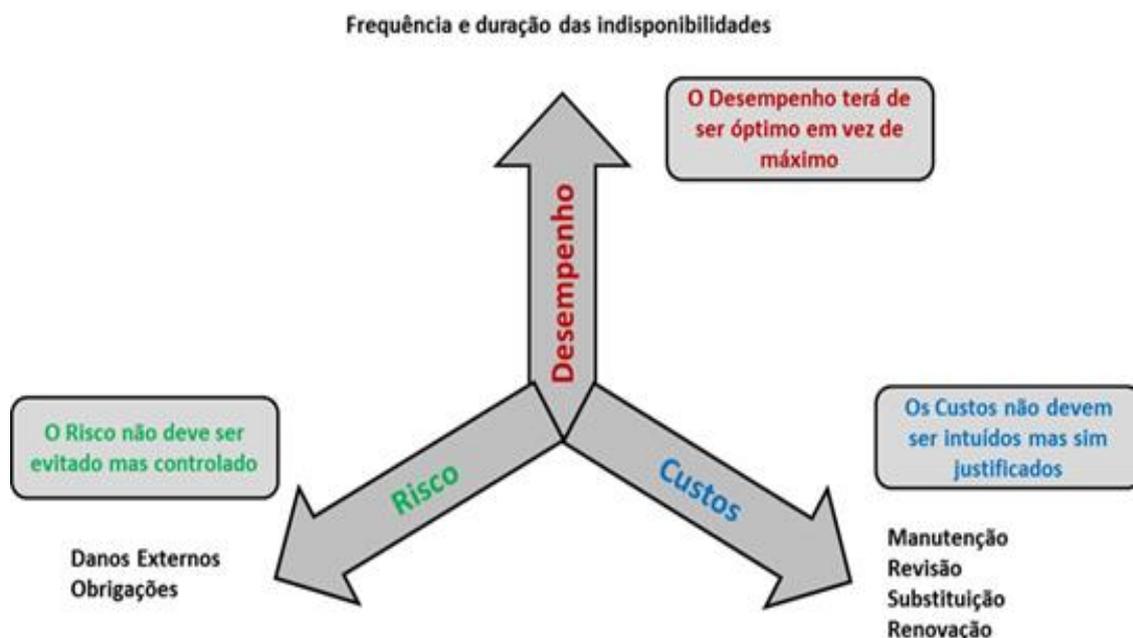


Figura 3 - O equilíbrio entre os fatores "Custos", "Desempenho" e "Risco como objetivo da gestão de ativos (retirado da documentação interna da empresa EDP Produção)

## 2.2. Manutenção

A manutenção de equipamentos é uma componente chave do processo de gestão de ativos físicos. Esta deve ser vista como um investimento gerador de um retorno positivo a longo prazo, conseguido através da garantia de melhorias no rendimento dos equipamentos bem como o aumento do seu ciclo de vida, qualidade do produto e conseqüente redução de custos.

Todo o ser humano, enquanto possuidor de bens da mais variada natureza, sente a necessidade de os conservar, para que continuem a cumprir a sua função de forma correta e durante o máximo tempo possível.

Segundo Wyrebski (1997), a conservação de instrumentos e ferramentas é uma prática observada, historicamente, desde os primórdios da humanidade, mas apenas no século XVI, quando foram inventadas as primeiras máquinas têxteis a vapor, é que surgiu a função manutenção. Nesta altura quem exercia a manutenção era o próprio operador das máquinas que na maioria dos casos, era o seu proprietário também.

Devido ao significativo avanço da indústria e tecnologia, a manutenção e sua gestão ganhou uma enorme relevância no posicionamento de qualquer empresa no mercado pois, a falha de

um equipamento, para além do custo associado à sua reparação, representa muitas vezes uma perda de produção que pode ter custos bastante elevados.

Todo o ativo físico que é utilizado como meio para garantir o desempenho de uma determinada função está sujeito a avarias sendo que estamos perante uma avaria quando determinado ativo deixa de cumprir a sua função dentro dos parâmetros definidos como aceitáveis ou mesmo por completo.

Segundo a NP EN 13306 (2007), avaria é um acontecimento definido como *“cessação da aptidão de um bem para cumprir uma determinada função”*, enquanto *“em falha”* é o *“estado de um bem inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devida à manutenção preventiva ou outras ações programadas, ou devida à falta de recursos externos”*.

Segundo Monchy (1989), *“a Manutenção dos equipamentos de produção é um elemento chave tanto para a produtividade das indústrias quanto para a qualidade dos produtos. É um desafio industrial que implica discutir as estruturas atuais inertes e promover métodos adaptados à nova natureza dos materiais.”*

### **2.2.1. Definição de Manutenção**

Pinto (1994) define manutenção como *“um conjunto integrado de atividades que se desenvolve em todo o ciclo de vida de um equipamento, sistema ou instalação e que visa manter ou repor a sua operacionalidade nas melhores condições de qualidade, custo e disponibilidade, com total segurança”*.

Farinha (1997) aponta como possível definição *“a combinação de ações de gestão, técnicas e económicas, aplicadas aos bens, para otimização dos seus ciclos de vida”*

Cabral (2004) descreve a manutenção como *“o conjunto das ações destinadas a assegurar o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que elas são intervencionadas nas oportunidades e com o alcance certos, de maneira a evitar que avariem ou baixem de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global otimizado”*.

A definição adotada pela EDP Produção, bem como para a realização deste trabalho é a que está presente na NP EN 13306 (2007). A NP EN 13306 (2007) é a norma portuguesa que contém todas as terminologias afetas ao universo da manutenção referindo-se a esta como *“a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida”*. Uma vez que esta é a norma que vigora atualmente em Portugal assume-se então, no presente trabalho, a definição de manutenção que nela consta.

É possível notar que com o desenvolvimento de novas técnicas e métodos, a definição de manutenção tem sofrido algumas alterações. É de extrema importância que se mantenha esta definição o mais verdadeira e atual possível pois é onde assenta qualquer filosofia, método ou projeto de gestão de manutenção de ativos físicos.

### **2.2.2. Objetivo e Importância da Manutenção**

A qualidade e quantidade da produção efetuada pelas empresas, que operam em meio industrial e que dispõem de ativos físicos para a garantir, dependem do bom funcionamento e capacidade dos mesmos para cumprir funções dentro dos parâmetros de qualidade definidos. É então necessário a adoção de métodos, ferramentas e estratégias que visem manter o bom desempenho das funções e que o façam da forma mais otimizada possível.

Farinha (1997) afirma que o objetivo primário de qualquer sector de manutenção é garantir que os equipamentos sob a sua responsabilidade cumpram a função para a qual foram postos ao serviço dos utilizadores, elegendo a maximização da disponibilidade como objetivo essencial.

Para que se torne possível atingir esses objetivos é necessária a existência de um órgão de gestão de manutenção dos ativos e, segundo Márquez et. al (2009), a meta de gestão da manutenção passa por fases e respetivas ferramentas em busca de melhor retorno, maior disponibilidade e desempenho dos equipamentos e chega à análise do ciclo de vida dos ativos.

O principal objetivo da manutenção é o de minimizar ou eliminar falhas garantindo um equilíbrio estável entre diversos fatores fundamentais em meio industrial – a qualidade do produto, a segurança dos operadores, a disponibilidade e custo de reparação dos equipamentos.

Ao longo do tempo tem-se verificado que a exigência dos diversos mercados tem sofrido uma evolução bastante acentuada no sentido crescente. Um bom exemplo disso é o caso do mercado energético em Portugal onde nos últimos anos se tem verificado um grande aumento da concorrência devido à sua liberalização. Intensifica-se então o desafio, que é posto aos órgãos de gestão das empresas, de procurar soluções por todas as áreas e ferramentas no sentido de obter melhores resultados e consolidar a sua posição estratégica no mercado.

Num passado não muito distante o setor de manutenção dos ativos associados à produção de uma empresa era visto como “o patinho feio” entre os diversos setores uma vez que se considerava que todos os esforços para manter o bom estado de funcionamento dos equipamentos não passavam de um “mal necessário”. Hoje em dia predomina outra mentalidade no meio industrial, que contempla e se foca na manutenção de acordo com a sua importância e papel ativo na atividade industrial (Cabral, 1998).

A manutenção está diretamente ligada à rentabilidade do processo produtivo, com uma influência na qualidade, volume e custo da produção. Como tal, os objetivos da manutenção têm de estar virados e interligados com os objetivos globais da empresa. Cabral (1998) afirma que o segredo reside em estabelecer um equilíbrio entre o benefício e o custo que maximize o contributo positivo da manutenção para a rentabilidade da empresa.

Existem três aspetos fundamentais na realidade industrial, que se apoiam diretamente na manutenção, e que fazem sobressair a sua importância – aspetos económicos, sociais e legais. O aumento da vida útil e disponibilidade dos equipamentos, resultantes de uma boa prática de manutenção, alimentam diretamente os aspetos económicos da empresa, uma vez que se consegue maximizar o rendimento dos investimentos efetuados. É importante nunca ser esquecido o fato de que a indisponibilidade de um equipamento representa custos, tanto diretos como indiretos, que podem ser elevadíssimos (custos diretos são aqueles que estão diretamente relacionados com a reposição da função do ativo sendo os custos indiretos todos aqueles que advêm da quebra de produção causada pela paragem do mesmo). A qualidade do produto, garantida pelo bom desempenho dos ativos na produção, é também um fator de extrema importância uma vez que contribui para o bom relacionamento entre a empresa e seus clientes e permite reduzir os desperdícios de produção. Utilizando também a manutenção como pilar estrutural está o cumprimento de toda a legislação a que as organizações na área industrial estão sujeitas. Esta legislação visa efetuar uma normalização de aspetos relacionados com o ambiente e segurança, tais como: poluição (emissões gasosas, descargas líquidas e resíduos e a insegurança ou riscos de acidente e o incómodo (ruído, fumos ou odores) (Pinto, 1994).

Aliada à existência de uma manutenção capaz de garantir todos os aspetos referidos anteriormente está a necessidade de uma metodologia de gestão da mesma que a garanta o mais otimizada possível evitando tanto a manutenção por defeito como a manutenção por excesso. Novos métodos de gestão da manutenção têm sido desenvolvidos e é essencial que as empresas adotem uma postura recetiva em relação a estes, procurando a melhoria contínua dos planos de manutenção dos seus ativos físicos.

Na figura 4 está representado um esquema dos fatores que têm vindo a enaltecer o papel da manutenção no meio industrial.

### **2.2.3. Evolução da Manutenção**

No decorrer da evolução da humanidade a manutenção apresentou também uma constante e acentuada evolução, podendo ser dividida em diversas fases, de acordo com o grau de desenvolvimento tecnológico e com a influência das máquinas e equipamentos na economia das empresas.



*Figura 4 - Fatores que influenciam a importância da manutenção.*

Numa época de pré revolução industrial não existiam equipas dedicadas à atividade de manutenção. O operador dos equipamentos, que era na maioria dos casos seu proprietário e construtor, era também responsável pela sua manutenção. A participação das máquinas na economia era relativamente pequena e como tal, as suas avarias pouca relevância tinham no desenvolvimento dos negócios. Nesta fase a complexidade das máquinas era relativamente pequena pelo que os esforços de manutenção não eram muito acentuados.

No século XIX surgem as grandes invenções que revolucionaram a vida do ser humano: a eletricidade, as máquinas a vapor e os motores. A complexidade das máquinas começa a aumentar, exigindo conhecimentos especiais para a sua operação e reparação. Nesta fase os equipamentos já influenciam diretamente o dia-a-dia das pessoas bem como a sua qualidade de vida pelo que se torna necessária uma maior agilidade na sua reparação. Surge então a necessidade de pessoal especializado e a disponibilidade de recursos para a execução da manutenção.

No ano de 1914 dá-se o que foi uma das maiores catástrofes para a humanidade e ao mesmo tempo uma grande “rampa de lançamento” para a área tecnológica – a Primeira Guerra Mundial. Esta vem demonstrar a grande influência das máquinas no poder das nações que, com a necessidade de produzir em grande escala, criam as primeiras grandes indústrias. Nesta altura já era necessário garantir o nível de produção, pelo que a indisponibilidade dos equipamentos já causava um grande transtorno. Como meio para diminuir a indisponibilidade foram criadas equipas especializadas para efetuar reparações rápidas nascendo assim a manutenção corretiva.

Em 1939 dá-se outro grande evento impulsionador da tecnologia e, mais concretamente, da indústria aeronáutica – a Segunda Guerra Mundial. Os aviões são máquinas que praticamente não admitem defeitos, surgindo então a necessidade de prevenir as suas falhas. É então nesta época, que coincide com a emergência da eletrónica e primeiros computadores que alguns instrumentos começam a ser incorporados nas máquinas com a finalidade de auxiliar a operação e programação da manutenção. Surge assim a manutenção preventiva.

Nesta fase as organizações já demonstram uma atitude proactiva em relação à manutenção sendo este um ponto de viragem crucial para o desenvolvimento da mesma. A figura seguinte demonstra a mudança de abordagem neste ponto.

<u>Ontem</u>	<u>Hoje</u>
<b>Eficiência</b>	<b>Eficácia</b>
Reparar o mais rápido possível	Manter o equipamento disponível
Preocupação limitada à Manutenção	Preocupação com a empresa

Figura 5 - Mudança no paradigma da gestão da manutenção.

A crise do petróleo dá-se em meados do século XX, mais precisamente entre os anos 1950 e 1970. Uma vez que representava a matéria-prima mais utilizada e fundamental para os processos industriais, gerou grande impacto nos custos de produção. Com a necessidade de redução de custos surgiu a Engenharia da Manutenção, que promove o desenvolvimento primeiras técnicas aplicadas à monitorização da condição dos equipamentos. As filosofias de manutenção corretiva e preventiva sistemática já não são suficientes para cumprir os requisitos impostos. Nasce assim novas metodologias como o RCM (*Reliability Centered Maintenance*) e o RBM (*Risk Based Maintenance*) que permitem efetuar uma manutenção baseada nas previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos de degradação dos ativos. Emerge assim a manutenção preditiva.

Desde 1970 até aos dias de hoje tem-se verificado um aumento exponencial da concorrência na indústria devido ao, cada vez mais acentuado, fator da globalização. Novas técnicas de controlo de qualidade geram produtos de melhor desempenho e tornam-se indispensáveis para a manutenção e posicionamento das empresas no mercado. A engenharia da manutenção torna-se uma fundamental para a melhoria da produtividade e em diversos países, como o Japão e os Estados Unidos, nascem ferramentas administrativas que integram a produção com a manutenção melhorando a qualidade dos produtos e reduzindo os custos de manutenção. A mais conhecida é o TPM (*Total Productive Maintenance*).

É do senso comum o fato de que as exigências futuras continuarão a acentuar-se sobre a melhoria do desempenho, particularmente maior disponibilidade, fiabilidade e duração da vida útil dos equipamentos (Zaians, 2003).

#### 2.2.4. Tipos de Manutenção

Como foi possível constatar no subcapítulo anterior, ao longo da história da humanidade têm surgido novas políticas de manutenção como forma de responder o melhor possível às solicitações de cada época. Hoje em dia todas elas são utilizadas na indústria.

A figura seguinte representa os vários tipos de manutenção sendo que apenas se encontram representados os de maior relevância para a estratégia de manutenção atual adotada pela D.O.M. (*Direção de Otimização e Manutenção*) da EDPP.

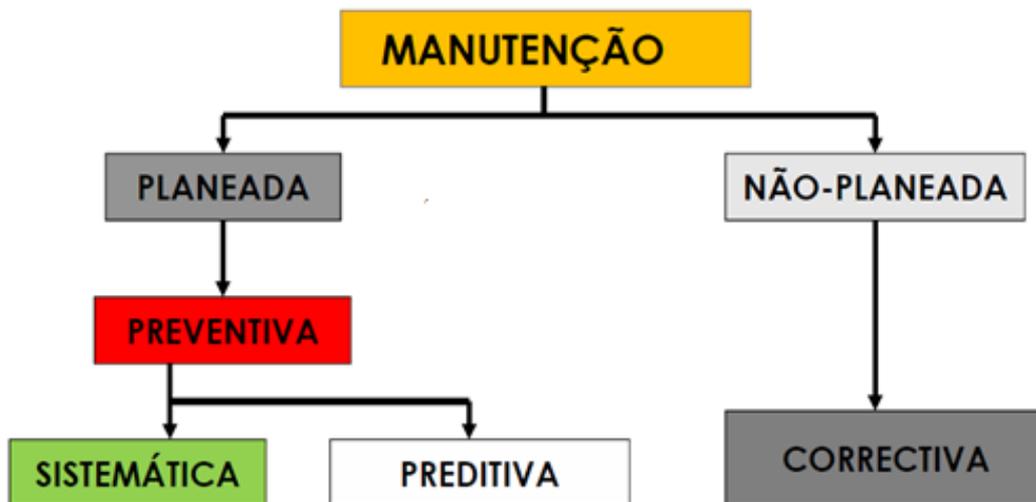


Figura 6 - Tipos de manutenção

É possível concluir, através da visualização da figura anterior, que a manutenção se divide em duas grandes áreas: a manutenção planeada e a manutenção não-planeada.

A manutenção planeada abrange todas as ações efetuadas antes da falha (A.F.) e é constituída pela política de manutenção preventiva que, por sua vez, pode assumir a forma de sistemática (MPS) ou preditiva (MPP).

A manutenção não-planeada é aquela que é executada depois da falha (D.F) e engloba a política de manutenção corretiva (MC).

#### **2.2.4.1. Manutenção Corretiva**

A manutenção corretiva é um tipo de manutenção que basicamente assenta no conceito de “funcionar até falhar” e onde nenhuma ação de manutenção é realizada para manter o equipamento antes da falha. Este tipo de manutenção pode ser visto como uma “faca de dois gumes”: Por um lado, se se estiver a lidar com um equipamento relativamente novo é de esperar que não ocorram falhas. Ao utilizar um programa de manutenção cem por cento baseado numa filosofia corretiva não existirão custos associados à sua manutenção até que exista uma falha e isso podia ser visto como um intervalo de tempo em que se estaria a poupar dinheiro.

No reverso da medalha está a realidade. Na realidade, os custos associados a uma política de manutenção corretiva ascendem aos custos de uma preventiva. Isto porque, na maioria dos casos a falha ou mau funcionamento de um componente de um equipamento, para além de afetar a produção, afeta diretamente outros componentes originando falhas cada vez mais frequentes e dispendiosas (US Department of Energy, 2010).

A norma NP EN 13306 (2007) define manutenção corretiva como *“manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida”*.

A tabela 1 indica as vantagens e desvantagens deste tipo de manutenção.

#### **2.2.4.2. Manutenção Preventiva Sistemática**

A manutenção preventiva sistemática manifesta-se sob a forma de ações efetuadas em intervalos de tempo ou unidades de funcionamento constantes e que visam detetar, impedir ou atenuar a degradação do mesmo com o objetivo de manter ou prolongar a sua vida útil através do controlo da degradação.

A marinha dos E.U.A foi pioneira neste tipo de manutenção quando se deparou com a necessidade de aumentar a fiabilidade dos seus navios. Este, embora não seja o mais otimizado que existe, permite diminuir a ocorrência de falhas, aumentar o ciclo de vida dos equipamentos bem como melhorar o seu desempenho. Como é de esperar, a combinação de todas estas valias a longo prazo traduz-se numa redução significativa de custos (US Department of Energy, 2010).

Tabela 1 - *Vantagens e desvantagens da manutenção corretiva.*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo</li> <li>• Menos mão-de-obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento do custo devido ao tempo de indisponibilidade não planeado do equipamento</li> <li>• Aumento do custo da mão-de-obra de reparação</li> <li>• Custo relacionado com a reparação ou substituição de equipamentos</li> <li>• Possíveis falhas secundárias derivadas da primeira.</li> <li>• Uso ineficiente dos recursos humanos. (mão de obra)</li> </ul>

Segundo a norma NP EN 13306 (2007) a manutenção sistemática é a “*manutenção preventiva efetuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem*” sendo que manutenção preventiva é a “*manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento do bem*”.

A tabela 2 enumera as vantagens e desvantagens deste tipo de manutenção.

#### **2.2.4.3. Manutenção Preventiva Preditiva**

Este tipo de manutenção é sem dúvida aquele que se revela mais vantajoso em equipamentos ou processos cuja sua falha representa grande transtorno para economia da empresa, segurança ou ambiente. A manutenção preditiva manifesta-se através de ações de medição de parâmetros de funcionamento dos equipamentos que permitem prever e atuar sobre as falhas antes que estas ocorram. Basicamente, a manutenção preventiva preditiva difere da manutenção preventiva sistemática adaptando-se à necessidade de manutenção do equipamento no seu estado atual (US Department of Energy, 2010).

Tabela 2 - *Vantagens e desvantagens da manutenção preventiva sistemática.*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidade no ajuste da periodicidade da manutenção</li> <li>• Aumento do ciclo de vida dos equipamentos</li> <li>• Poupança de energia</li> <li>• Redução de falhas nos equipamentos e/ou processos</li> <li>• Estimativa de redução de custos entre 12% a 18% comparativamente à manutenção corretiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falhas catastróficas ainda podem ocorrer</li> <li>• Trabalho intensivo</li> <li>• Por vezes inclui a realização de manutenção desnecessária</li> <li>• Possibilidade de falhas acidentais derivadas da realização de manutenção desnecessária</li> </ul>

O leque de vantagens da manutenção preditiva é vasto pelo que, através da sua utilização não só é possível eliminar quase por completo as falhas catastróficas, mas também minimizar custos de horas extra e inventário de peças, uma vez que se torna possível encomendar apenas quando se prevê a sua necessidade, e ainda otimizar a operação dos equipamentos poupando energia, reduzindo custos e aumentando a fiabilidade dos mesmos.

A norma NP EN 13306 (2007) define a manutenção preditiva como a *“Manutenção condicionada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem”* onde manutenção condicionada se define como a *“Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes”*.

A manutenção preditiva apoia-se em diversas técnicas de diagnóstico nomeadamente a termografia, análise de vibrações, análise de óleos, análise de partículas de desgaste, análise temperatura, controlo/monitorização do desempenho, ultrassons, inspeção visual, entre outros.

As vantagens e desvantagens da aplicação deste tipo de manutenção estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 - *Vantagens e desvantagens da Manutenção Preventiva Preditiva.*

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da disponibilidade dos componentes</li> <li>• Permite ações corretivas preventivas</li> <li>• Diminuição dos custos de peças e mão-de-obra</li> <li>• Melhor qualidade de produto</li> <li>• Melhoria na segurança laboral e ambiental</li> <li>• Melhoria na motivação dos trabalhadores</li> <li>• Poupança de energia</li> <li>• Estimativa de redução de custos entre 8% e 12% em relação à manutenção preventiva sistemática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior investimento no diagnóstico dos equipamentos</li> <li>• Maior investimento na formação dos trabalhadores</li> <li>• Potencial de poupança pode não ser visto claramente pela gestão numa fase inicial.</li> </ul>

### **2.3. Adequação da Estratégia de Manutenção aos Requisitos do Presente**

Como foi descrito anteriormente, a manutenção de equipamentos é uma componente chave do processo de gestão de ativos físicos. Esta deve ser vista como um investimento gerador de um retorno positivo a longo prazo, conseguido através da garantia de melhorias no rendimento dos equipamentos bem como o aumento do seu ciclo de vida, qualidade do produto e consequente redução de custos. O processo atual de gestão da manutenção deve contribuir para uma manutenção sustentada e focado na sua própria melhoria contínua. Contudo, a disciplina é um pré-requisito indispensável para o seu sucesso.

A figura seguinte representa as fases que devem incorporar o processo de gestão da manutenção.

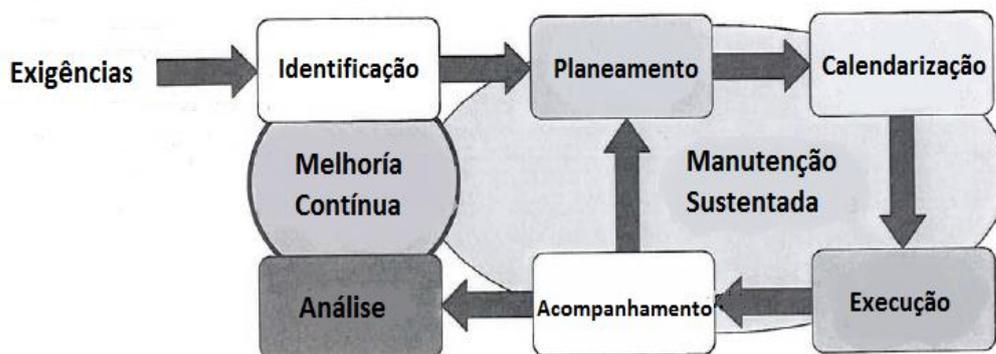


Figura 7 - Procedimento de gestão da manutenção (Adaptado de Mitchell, 2002)

Pode concluir-se, até este ponto, que a gestão de manutenção de equipamentos tem sofrido uma grande evolução, tendo início numa filosofia corretiva não-planeada e posteriormente encaminhando-se no sentido de se enquadrar cada vez mais numa filosofia preditiva através da introdução dos conceitos de fiabilidade e risco. A figura seguinte representa a evolução da gestão de manutenção na sua adequação com os fatores custo de manutenção e disponibilidade dos equipamentos.

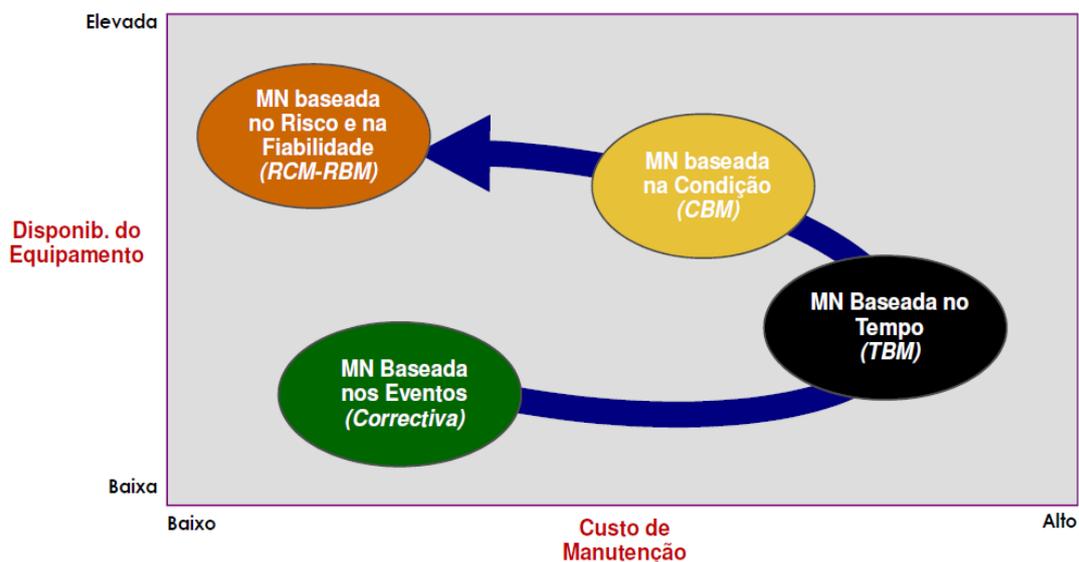


Figura 8 - Os vários tipos de manutenção na sua relação com a disponibilidade e custos (Retirado da documentação interna da EDP Produção).

Os novos métodos, assentes na filosofia preditiva e que se baseiam no estudo da fiabilidade, como é o caso da Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM), ou do risco, como é o caso da Manutenção Baseada no Risco (RBM), utilizam a probabilidade estatística de falha dos equipamentos para prever avarias e consequências das mesmas. Estes métodos têm revelado

resultados muito positivos pois permitiram adequar a periodicidade dos planos de manutenção evitando tanto a manutenção por excesso, que representa custos de manutenção mais elevados, como a manutenção por defeito, que representa um maior número de avarias e, conseqüentemente, maiores custos de manutenção e indisponibilidade.

Marqu ez et. al (2009), no seu artigo propõem a ado o de oito fases e diversas ferramentas na abordagem   estratégia de manuten o e que visam a busca de maior retorno, disponibilidade e desempenho do ciclo de vida dos equipamentos, estando este processo representado na tabela 4.

Tabela 4 - *Otimiza o da estratégia de manuten o (Adaptado de Marqu ez et. al., 2009)*

<b>Fase</b>	<b>Estrat�gia</b>	<b>Foco</b>
1	Defini�o de Indicadores-chave de desempenho (KPI's)	Efic�cia
2	Defini�o de ativos priorit�rios de manuten�o (An�lise de criticidade)	
3	Interven�o imediata nos pontos fracos de maior impacto (RCA; FMEA)	
4	Planeamento de planos e recursos de manuten�o. (RCM; RBM)	Efici�ncia
5	Plano preventivo: otimiza�o da programac�o e recursos	
6	Avalia�o e controlo da manuten�o	Avalia�o
7	An�lise do ciclo de vida dos ativos: otimiza�o e substituic�o	
8	Melhoria cont�nua e utiliza�o de novas t�cnicas	Melhoria

Ainda de acordo com os referidos autores, para acompanhar as mudanças e exigências do mercado, torna-se imperativo o uso combinado das diversas técnicas que levam   otimiza o dos investimentos em ativos. Ora, o incremento do  ndice de eficiência global leva   discussão quanto ao real uso coerente e sustentável dos ativos e dos investimentos, evitando ou procurando evitar os desperdícios. Os resultados, ou seja, as propostas de estratégia de manuten o, v o,   claro, além das técnicas apresentadas na presente disserta o. Pode dizer-se que   um assunto inesgotável; novos conceitos existem e novas propostas serão criadas.

# Capítulo 3 – Fiabilidade e o RCM

## 3.1. Introdução à Fiabilidade e Respetivas Ferramentas

Qualquer ativo físico (ou sistema de ativos físicos) é concebido para desempenhar uma determinada função com eficácia e dentro de certas restrições técnicas, ergonómicas e económicas.

Uma vez que todos os ativos físicos estão sujeitos à presença de degradação e, conseqüentemente, crescente probabilidade de falha é realista admitir que nenhum dura para sempre e que, durante parte do seu período de vida útil, encontrar-se-ão inoperacionais em resultado da ocorrência de falhas. Esta indisponibilidade, bem como a durabilidade são características dependentes, não só da conceção e dos materiais utilizados durante a sua fase de projeto, mas também da operação e manutenção a que estão submetidos durante o seu período de vida útil, que pode ser tanto menor quanto mais desadequadas estas forem. Estas características, que traduzem a longevidade e o comportamento em vida de um sistema, dependem, por sua vez, de características mensuráveis, entre elas a fiabilidade (Assis, 2010).

Segundo a *Reliasoft* (2015), desde os primórdios da história que a humanidade tenta prever o futuro e, felizmente, através do uso da análise de dados de vida útil dos ativos físicos, a engenharia da manutenção consegue aproximar-se dessa previsão apoiando-se na determinação da probabilidade de componentes, equipamentos e sistemas executarem as suas funções, durante o período desejado. A essa “probabilidade de sucesso” dá-se o nome de fiabilidade.

Demir & Yildiz (2016), chegam a afirmar que *“a fiabilidade é a melhor medida quantitativa da integridade de uma peça, componente, produto ou sistema.”*

### 3.1.1. Definição e Conceito de Fiabilidade

A qualidade é uma propriedade que pode alterar-se ao longo da vida de um ativo físico. Em consequência, a aceitabilidade de um ativo físico depende em parte do seu desempenho ao longo do tempo. A esta vertente da performance dá-se o nome fiabilidade. Pode então afirmar-se que a fiabilidade é a capacidade de um produto continuar a cumprir a sua função ao longo do tempo constituindo, juntamente com a qualidade, um critério a ter em conta quando se compara várias alternativas de decisão entre si (Assis 2010).

Segundo a norma NP EN 13306 (2007), a fiabilidade é *“a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo”*, sendo

que, “o termo «fiabilidade» também é utilizado como uma medida de desempenho da fiabilidade e poderá também ser definido como uma probabilidade”.

Para Assis (2010) a fiabilidade é “a probabilidade de um órgão funcionar satisfatoriamente (ou cumprir a função requerida) durante um certo intervalo de tempo (ou missão) sob condições especificadas”.

A Reliasoft (2015) define fiabilidade como “a capacidade ou probabilidade de peças, componentes, equipamentos, produtos e sistemas de desempenhar as suas funções requeridas, durante o tempo requerido, sem falhas, na realidade operacional a que estão sujeitos e pode ser especificada, projetada, prevista, testada e demonstrada”.

### 3.1.2. Tipos e Causas de Falha

Como já foi descrito anteriormente, falha é a cessação de funcionamento ou, mais frequentemente, degradação de um parâmetro de funcionamento até um nível considerado insatisfatório.

Existem essencialmente dois tipos de falha em meio industrial: A falha **imprevisível** e a falha **previsível**. Falhas **imprevisíveis** são aquelas que ocorrem de forma súbita e são normalmente denominadas de “**falhas catastróficas**”. As falhas **previsíveis** ocorrem de forma lenta e progressiva e são denominadas de “**falhas por degradação**” ou “falhas por deriva”.

Quanto à função de um equipamento é possível classificar as falhas como:

- **Falhas funcionais:** ultrapassagem de limites mínimos ou máximos previamente especificados para a função de um equipamento.
- **Avaria:** Estado de um ativo físico após a falha e antes de ser repostado.
- **Funcionamento degradado:** muitas falhas de função não implicam necessariamente a paragem do equipamento, podendo continuar em funcionamento degradado até surgir a oportunidade de corrigir.
- **Falhas potenciais:** condição física identificável que inicia a proximidade de uma falha.
- **Falhas ocultas:** falhas presentes em equipamentos que não estão a desempenhar uma função e que apenas são detetadas através de inspeções.

Segundo Assis (2010), existem diversos fatores que podem estar na causa-raiz da falha de um equipamento, nomeadamente:

- **Erros de projeto;**
- **Má seleção de material;**
- **Defeitos de fabrico;**
- **Manutenção inadequada;**
- **Sobrecargas em serviço;**
- **Condições de ambiente imprevistas.**

### **3.1.3. Requisitos e Etapas da Fiabilidade**

O desenvolvimento tecnológico leva a uma necessidade de conceção e fabrico de produtos com características de desempenho cada vez melhores, ou seja, os equipamentos operam a níveis de carga superiores, ao mesmo tempo que incorporam um maior grau de complexidade. Nesse sentido, o grande desafio para a Engenharia da Fiabilidade passa por corresponder às melhorias de desempenho, mantendo ou até melhorando os níveis de fiabilidade dos ativos físicos (Reliasoft, 2015).

A melhoria do desempenho e da fiabilidade tem, então, de ser conciliada por compromisso e/ou custos. A forma de conseguir cumprir os compromissos depende dos requisitos a que a aplicação em causa está submetida. Por exemplo, nas corridas de veículos motorizados não é requerida uma fiabilidade muito elevada, visto que iria influenciar o desempenho, e este é mais importante nessa situação. Já no caso da aviação ou da medicina, os requisitos de fiabilidade são naturalmente predominantes face a quaisquer outros (Assis, 2010).

Na indústria, os requisitos de fiabilidade colocam-se mais em termos económicos onde interessa encontrar o melhor compromisso entre o custo de obtenção de uma fiabilidade elevada e o custo resultante das falhas, como demonstra a figura 9.

Através da análise desta figura pode verificar-se que, enquanto os custos originados nas fases de projeto e de fabrico crescem ao ser solicitada uma maior fiabilidade, os custos resultantes das falhas durante a fase de exploração decrescem em resultado da menor frequência de falhas, existindo um ponto onde se consegue obter a minimização do custo total.

Este tipo de análise revela-se de extrema importância para empresas que dependem do retorno financeiro do ciclo de vida de um vasto leque de ativos físicos, como é o caso das empresas que exploram a produção e comercialização da energia elétrica.

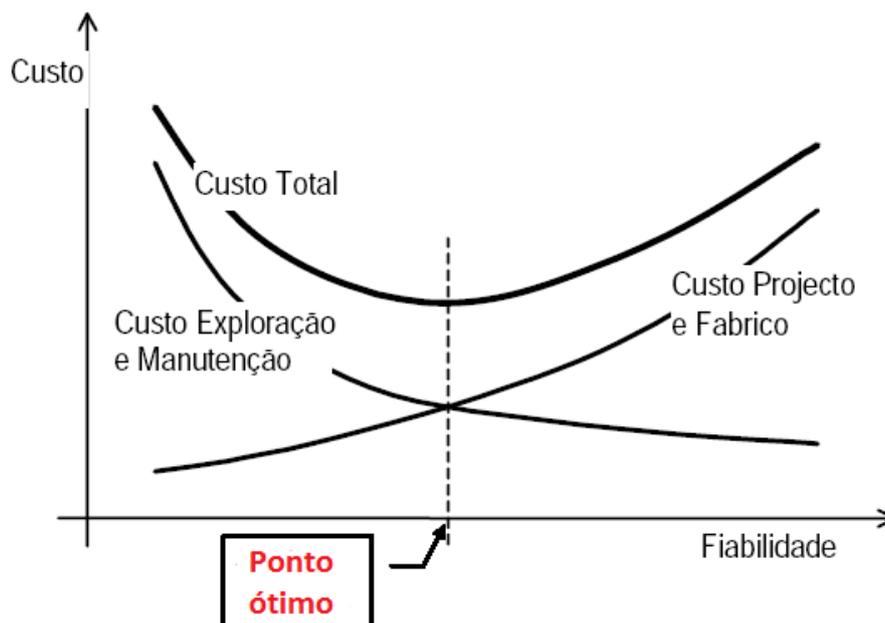


Figura 9- Requisitos e objetivos da fiabilidade - equilíbrio de fatores (Carinhas, 2009).

Uma vez assumido o princípio de que qualquer órgão deve funcionar em condições que proporcionem a maior eficácia, segurança e economia dos meios, então torna-se necessário percorrer três etapas:

- **Medição:** Dedução da expressão de fiabilidade adequada a cada tipologia de órgão e investigação do seu resultado
- **Melhoria:** Procura das formas mais adequadas conducentes á melhoria da fiabilidade global, balizadas por compromissos de custo e segurança.
- **Otimização:** maximização da fiabilidade do órgão, considerando-se como adquiridos um determinado peso, volume, custo e disponibilidade ou, inversamente, para uma fiabilidade fixada como objetivo, minimizar aquelas restrições (Assis, 2010).

#### 3.1.4. Análise de Risco de Falha (Hazard Analysis)

Falhas podem representar acontecimentos que põem em causa a segurança dos operadores e ações inseguras são erros humanos que podem ocorrer a qualquer altura do ciclo de vida de um ativo (Johansson, 2013).

A análise de risco de falha é uma técnica que direciona o seu foco para a identificação de falhas que podem representar perigo para a segurança, ambiente ou para a disponibilidade de equipamentos essenciais antes destas acontecerem (OSHA, 2002).

De um modo geral a análise de risco de falha consta dos seguintes aspetos principais:

- Identificação das potenciais causas de falha e sua classificação segundo o grau de criticidade.
- Estabelecimento das condições sob as quais as falhas apresentam a maior probabilidade de ocorrência e/ou maior gravidade.
- Especificação das ações preventivas ou curativas para minimização das consequências de falha.

A análise de risco de falha é tão importante na fase “após falha” como na fase de projeto. Na fase “após falha”, o papel do engenheiro de manutenção é fundamental, seja sugerindo ações corretivas ao projeto, seja na defesa de interesses legais, seja ainda na defesa de interesses económicos (Assis, 2010).

### **3.1.5. Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA)**

A análise de modos e efeitos de falha é uma metodologia projetada para identificar possíveis modos de falha de um ativo ou sistema de ativos físicos, avaliar o risco associado a esses modos de falha, classificar a sua criticidade e identificar e levar a cabo ações corretivas para abordar as que forem consideradas como críticas ([www.weibull.com](http://www.weibull.com)). Esta técnica é bastante eficaz na melhoria da fiabilidade.

A sua metodologia consiste nas seguintes ações:

1. Decomposição do sistema em todos os componentes que podem falhar e serão substituídos/reparados pela manutenção e determinação das respetivas inter-relações funcionais. Utilizam-se, neste caso, esquemas ou diagramas de blocos.
2. Descrição dos possíveis **modos de falha** de cada componente, face às condições de operação.
3. Identificação das **causas** de falha.
4. Identificação das possíveis **consequências** (efeitos) das falhas – até que ponto a operação é afetada?
5. Determinação da **probabilidade de falha** de cada componente e cálculo da fiabilidade do conjunto.

6. Classificação da **severidade** da falha, com o objetivo de separar os modos de falha que podem ser catastróficos daqueles que apenas podem causar meros contratemplos ou perdas económicas moderadas:
  - Grau I: falha menor – não afeta a performance e eficiência para além de limites aceitáveis;
  - Grau II: falha maior – afeta a performance e a eficiência para além de limites aceitáveis;
  - Grau III: falha crítica – degradação do sistema para além de limites aceitáveis podendo ocorrer situações de perigo;
  - Grau IV: Falha catastrófica – estragos significativos com falha da missão, podendo resultar em feridos ou mortes.
  
7. Descrição de ações curativas ou preventivas possíveis, com o objetivo de minimizar os efeitos e /ou reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas.

### **3.1.6. Análise de Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis)**

A análise de árvore de falhas é uma das técnicas, lógicas e probabilísticas, mais importantes no estudo da fiabilidade de sistemas. Esta pode ser descrita simplesmente como uma técnica analítica, onde um estado indesejado de um equipamento (evento de topo) é especificado e o sistema é analisado no sentido de encontrar todos os caminhos que possam levar à possível falha primária (Johansson 2013).

A árvore de falhas, por si só, é um modelo gráfico, com várias combinações de falhas, sequenciais e paralelas que, caso ocorram, irão originar o evento de topo em questão (Marvin & Arnljot, 2004). O diagrama lógico da árvore de falha é então, o negativo do diagrama lógico do respetivo sistema (ou parte), pois este não é senão aquilo que se poderia considerar como uma árvore de sucesso para a função pretendida do sistema analisado (Assis, 2010).

A análise de árvores de falha constitui uma ferramenta auxiliar da análise de modos e efeitos de falha (FMEA), oferecendo as seguintes facilidades:

- Organização do pensamento (quer na análise da causa de falha, quer na síntese da intervenção curativa ou preventiva);
- Relevância dos pontos fracos e das variáveis que ocorrem para aqueles, facilitando decisões de melhoria da fiabilidade (alterando a conceção ou especificando um programa de inspeção);

- Disponibilização de uma “árvore de detecção de avarias” para uso, como e quando necessário, na operação e manutenção do sistema.

A árvore de falha pode constituir um método quantitativo e qualitativo uma vez que relaciona logicamente os eventos que tomam parte no processo de falha, utilizando circuitos lógicos e álgebra de *Boole* (e por isso qualitativa) e pode ser indicada em cada evento a correspondente probabilidade de falha, o que vai permitir a realização de cálculos de fiabilidade dos subconjuntos e do próprio sistema

A árvore de falha constitui um fluxograma lógico onde todos os eventos são descritos através de símbolos lógicos, sendo os principais referidos na figura seguinte:

	Evento básico.
	Evento intermédio.
	Porta E – Uma operação mediante a qual todas as entradas ou eventos (falhas básicas) têm de coexistir em simultaneidade para que uma falha ocorra.
	Porta OU – Uma operação pela qual qualquer uma das entradas ou eventos (falhas básicas) produz uma resposta.
	Acontecimento inconsequente ou com dados insuficientes para desenvolvimento posterior.

*Figura 10* – Principais símbolos utilizados em árvores de falhas.

A figura 11 representa uma árvore de falhas qualitativa, onde o evento de topo se refere à incapacidade de arranque de um motor fora-de-borda de um barco.

### 3.2. Medição Empírica e Cálculo da Fiabilidade

Os fabricantes de bens duráveis realizam ensaios com vista à medição empírica da fiabilidade do seu produto. Consideremos, por exemplo, um ensaio de laboratório em que o fabricante de interruptores dispõe de 300 unidades, todas idênticas.

O ensaio será realizado em condições de carga e ambiente iguais e consistirá na realização de ciclos “ligar-desligar” até que todos se tenham incapacitado (ensaio destrutivo), sendo que, o número de ciclos por unidade de tempo é constante (Assis, 2010). A **fiabilidade  $R(c)$**  deste produto é a probabilidade de ele se encontrar ainda em funcionamento no ciclo “c”, a qual pode ser calculada pela equação (1).

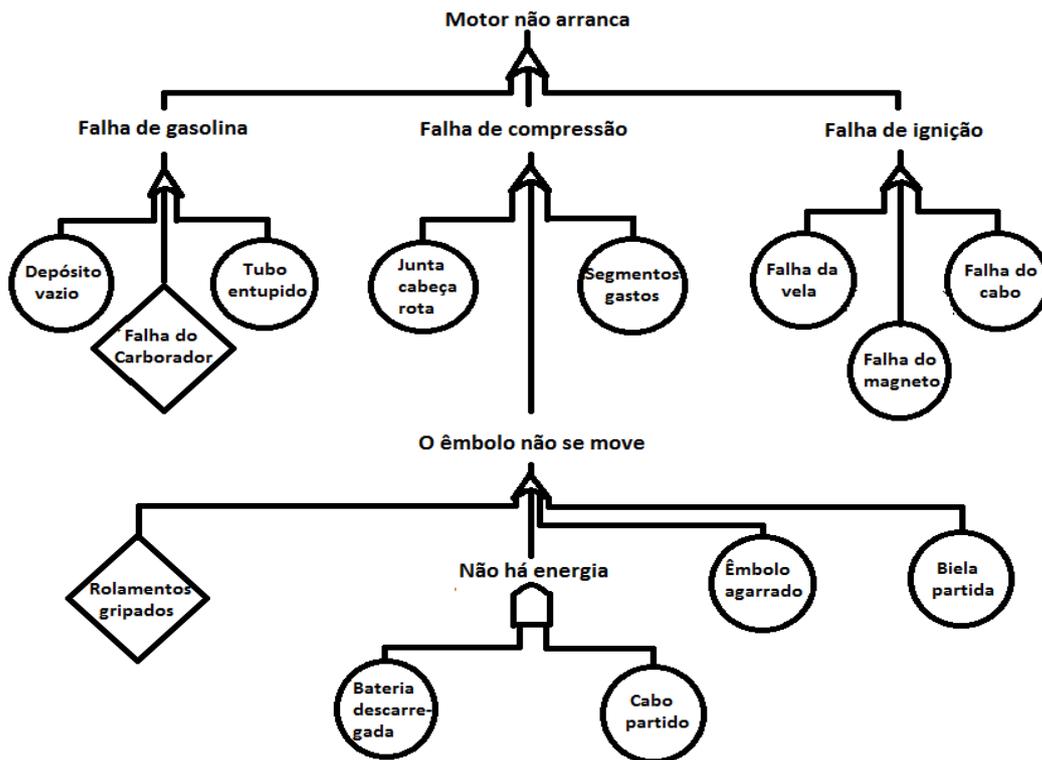


Figura 11 - Exemplo de árvore de falhas (adaptado de Assis, 2010)

$$R(c) = \frac{N^{\circ} \text{ de sobreviventes até ao ciclo } c}{N^{\circ} \text{ existente no início do ensaio}} \quad (1)$$

O complementar da fiabilidade de um componente é a sua **probabilidade acumulada de falha**  $F(c)$  dada por:

$$F(c) = 1 - R(c) \quad (2)$$

ou:

$$F(c) = \frac{N^{\circ} \text{ de falhados até ao ciclo } c}{N^{\circ} \text{ existente no início do ensaio}} \quad (3)$$

Pode ainda definir-se duas outras medidas de fiabilidade: a **função densidade de probabilidade de falha**  $f(c)$ :

$$f(c) = \frac{N^{\circ} \text{ de falhas no intervalo } \Delta c}{(\text{intervalo } \Delta c) \cdot (N^{\circ} \text{ existente no início do ensaio})} \quad (4)$$

e a **função de risco** (ou taxa instantânea de falhas)  $h(c)$ :

$$h(c) = \frac{N^{\circ} \text{ de falhas no intervalo } \Delta c}{(\text{intervalo } \Delta c) \cdot (N^{\circ} \text{ de sobreviventes no ciclo } (c - \Delta c))} \quad (5)$$

Como se pode constatar, é possível, através de um ensaio, medir a fiabilidade de forma empírica. Veja-se agora como, através do cálculo infinitesimal, se pode generalizar a análise de fiabilidade.

Aqui o tempo é a variável independente, sendo que, as conclusões se mantêm válidas para qualquer outra variável específica (Km, manobras, ciclos, etc.) da qual a fiabilidade dependa. A referência ao tempo pode ser feita de duas formas: O tempo de calendário e o tempo de funcionamento.

Considere-se então um número muito grande  $N_0$ , de órgãos idênticos submetidos às mesmas condições durante um período longo. Na figura seguinte pode constatar-se que, em cada momento  $t$  ao longo do ensaio, cada órgão apresenta uma probabilidade de falhar  $F(t)$  e de sobreviver  $R(t)$  acontecendo que o primeiro vai significativamente aumentando e o segundo diminuindo.

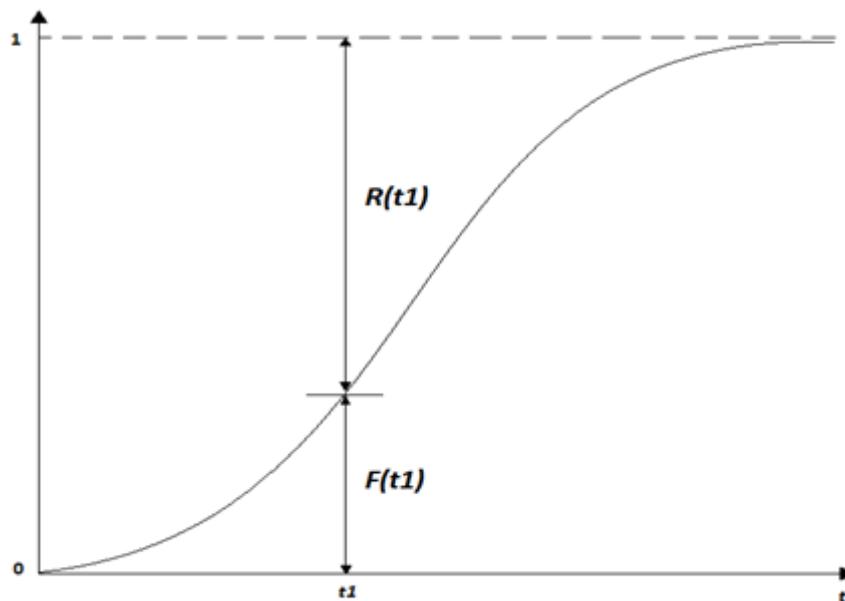


Figura 12 - Fiabilidade vs Probabilidade de falha ao longo do tempo.

As expressões 6 e 7 permitem calcular as probabilidades de sobrevivência e falha, respetivamente, assumindo que no momento  $t$  existem  $N_s$  órgãos sobreviventes e  $N_f$  órgãos falhados:

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad (6)$$

(7)

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N_0}$$

Através da derivação da expressão 7 é possível obter a função que traduz a percentagem de órgãos que estão a falhar no momento  $t$  por unidade de tempo relativamente à população inicial,  $N_0$  – **A função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$** :

(8)

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} = f(t)$$

Note-se que  $f(t)$  é uma probabilidade incondicional, isto é, não está condicionada ao número de órgãos sobreviventes,  $N_s$ , em cada momento, mas sim à população inicial,  $N_0$ . Caso se refira a um componente em funcionamento, a função  $f(t)$  fornece a probabilidade desse componente falhar exatamente no momento  $t$ .

Através da integração da função  $f(t)$ , entre o instante inicial – em que se encontram em funcionamento  $N_0$  órgãos – e o momento genérico  $t$ , é possível obter a **função probabilidade acumulada de falha  $F(t)$** .

(9)

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt$$

Logo,

(10)

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (=) \quad R(t) = \int_t^{+\infty} f(t) \cdot dt$$

Ao longo do ensaio é lógico o fato de que irá existir um aumento progressivo do número de elementos que falham,  $N_f$ , e um decréscimo dos elementos sobreviventes,  $N_s$ . A função  **$h(t)$**  designa-se **função de risco** ou **taxa instantânea de falhas** e traduz a taxa á qual os órgãos estão a falhar por unidade de tempo no momento  $t+\Delta t$ , em relação ao número de órgãos sobreviventes,  $N_s$ , no momento  $t$ . A expressão 11 representa esta função.

(11)

$$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (=) \quad h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Se se derivar em ordem a  $R(t)$  e, seguidamente, integrar o resultado entre 0 e  $t$ , obtemos uma expressão independente da forma específica da função de falha, sendo designada, por esta razão, **função geral da fiabilidade**.

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(t).dt} \quad (12)$$

Caso se disponha de informação sobre os tempos (manobras, ciclos, etc.) entre as sucessivas falhas de um determinado componente não reparável (**TTF – Time To Failure**), pode calcular-se o tempo médio até à falha, (**MTTF – Mean Time To Failure**), ou através da seguinte expressão:

$$MTTF = \int_0^{\infty} f(t).t.dt (=) MTTF = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (13)$$

No caso dos componentes reparáveis, nos quais, à medida que os seus órgãos ou componentes vão falhando, são desmontados e reparados (ou substituídos), utiliza-se o **MTBF (Mean Time Between Failures)**.

Existe ainda o acrónimo **MTTFF (Mean Time To First Failure)**, o qual é usado para designar a primeira falha de um sistema não reparável e não recuperável – caso de mísseis, satélites, etc. (Assis 2010)

### 3.3. Curva da Banheira

O gráfico que resulta da função  $h(t)$  representa a evolução da taxa de falhas de um componente ao longo do tempo (manobras, ciclos, etc.). Este gráfico traduz-se numa curva, vulgarmente conhecida como “curva da banheira”, e onde se identificam três períodos característicos: **período de infância**, **período de vida útil** e **período de desgaste**. Na figura seguinte está representada esta curva característica.

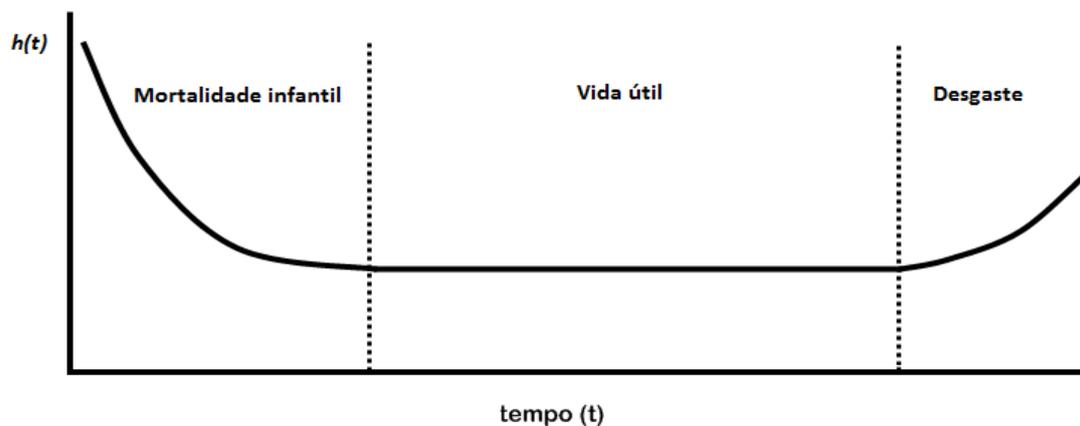


Figura 13 – Evolução da taxa de falhas ao longo do tempo ou "curva da banheira".

Quando os componentes de uma amostra entram em funcionamento, apresentam uma taxa instantânea de falhas elevada, com declive decrescente ao longo do tempo. Isto deve-se a várias causas possíveis: deficiências de projeto, defeitos de fabrico, controlo de qualidade deficiente, instalação incorreta ou rodagem deficiente – Mortalidade infantil.

Quando termina o período de mortalidade infantil verifica-se que a taxa instantânea de falhas estabiliza num valor quase constante, entrando num período que se estende por parte significativa da vida do componente – Período de vida útil. Aqui a função de risco,  $h(t)$ , é praticamente constante e designa-se por taxa de falhas, sendo representada por  $\lambda$ . Neste período as falhas são devidas principalmente a solicitações de operação superiores às projetadas, ocorrendo de forma aleatória.

Durante este período verifica-se que, quer a função densidade de probabilidade de falhas,  $f(t)$ , quer a função de fiabilidade  $R(t)$  são funções exponenciais negativas:

$$R(t) = e^{-\lambda.t} \quad (14)$$

$$f(t) = \lambda. e^{-\lambda.t} \quad (15)$$

No período de desgaste verifica-se um aumento acentuado da taxa instantânea de falhas. Isto acontece devido ao estado degradado em que os componentes se encontram nesta fase. Este aumento pode ser evitado através da aplicação de manutenção preventiva.

No caso de sistemas reparáveis ou de sistemas não reparáveis que falham casualmente, a **taxa média de falhas** pode ser calculada, sendo expressa em número de falhas por 1000 horas ou número de falhas por milhão de horas.

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ de falhas}}{\text{Tempo de operação}} \quad (16)$$

Quando a taxa média de falhas é aproximadamente constante, podemos calcular o seu inverso, ou seja, o **tempo médio entre falhas**.

$$MTTF = MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

Quando um componente se encontra no seu período de vida útil é de extrema utilidade que se possa determinar a fiabilidade de uma determinada missão. Suponha-se que um componente com uma idade  $t_1$  vai funcionar durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Quando terminar essa

missão, terá a idade  $t_2$ . A fiabilidade da missão pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$R(\Delta t|t_1) = \frac{R(t_1 + \Delta t)}{R(t_1)} = \frac{e^{-\lambda(t_1 + \Delta t)}}{e^{-\lambda t_1}} = e^{-\lambda \Delta t} \quad (18)$$

O resultado desta equação é sempre independente de  $t_1$  uma vez que a taxa instantânea de falhas  $h(t)$  não se altera durante o período de vida útil (Assis, 2010).

### 3.4. Distribuições de Probabilidade

O cálculo da fiabilidade assenta na distribuição da probabilidade de falha dos ativos físicos ao longo do tempo. Consoante o período do seu ciclo de vida bem como as suas características, estes apresentam diferentes comportamentos, quanto à falha, fazendo com que seja necessária a seleção da distribuição de probabilidade que melhor se adequa a cada caso. De seguida serão apresentadas as distribuições de probabilidade mais utilizadas na área da Engenharia da Fiabilidade.

#### 3.4.1. Weibull Bi-paramétrica e Tri-paramétrica

A distribuição de *Weibull* foi criada em 1937 pelo sueco *Waloddi Weibull* aquando da sua investigação na área da fadiga de materiais, tendo sido apresentada oficialmente nos Estados Unidos em 1951 (Moss, 2005). Esta função é muito usada na área da Engenharia devido à sua versatilidade na descrição do tempo de vida até à falha de componentes sujeitos a fenómenos de degradação. Esta flexibilidade deriva do fato de na sua fórmula geral, a distribuição de Weibull ser composta por três parâmetros que se podem ajustar de modo a que a função se adequa ao comportamento fiabilístico de qualquer bem: **o parâmetro de forma  $\beta$ ; o parâmetro de escala  $\eta$  e o parâmetro de localização  $\gamma$ .**

A **função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$**  da distribuição de *Weibull* tri-paramétrica é dada pela seguinte expressão:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left[ \frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (19)$$

Sendo a **probabilidade de falha acumulada  $F(t)$**  dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (20)$$

Uma vez que a **função fiabilidade**  $R(t)$  complementa a função probabilidade de falha acumulada, então esta é dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (21)$$

Como referido anteriormente, a **taxa de avarias**  $\lambda(t)$  de um componente representa uma relação entre a função densidade de probabilidade de falhas,  $f(t)$ , e a função de Fiabilidade,  $R(t)$ , de um componente num determinado instante, pelo que, nesta distribuição, a sua expressão é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (22)$$

Pode ainda ser calculada a **fiabilidade condicional**,  $R(t|T)$ , que é dada pela seguinte expressão:

$$R(t|T) = \frac{R(T+t)}{R(T)} = \frac{e^{-\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \quad (23)$$

Na maioria dos modos de falha por degradação, os tempos entre falhas apresentam um período inicial,  $\gamma$ , sem falhas. Contudo, quando se trata os dados de falha de um qualquer componente, considera-se muitas vezes um limite inferior de vida de  $\gamma = 0$  como uma aproximação bastante aceitável (Assis 2010). Nesta situação utiliza-se a distribuição de *Weibull* de bi-paramétrica cuja respetiva função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (24)$$

Nesta distribuição deve salientar-se o seguinte (Moss, 2005):

- A distribuição exponencial surge através desta distribuição quando o parâmetro de forma,  $\beta$ , assume o valor unitário.
- O parâmetro de escala,  $\eta$ , representa o tempo expectável de falha para 63,2% de uma dada população.

É possível verificar que, no cálculo analítico apoiado nas expressões de *Weibull*, é sempre necessário o conhecimento prévio dos valores dos parâmetros, pelo que, estes terão de ser obtidos experimentalmente a partir da análise do comportamento real de uma amostra dos componentes em causa, ou através de ensaios. Estes parâmetros são os responsáveis pela grande versatilidade desta distribuição como se poderá constatar de seguida:

➤ **Parâmetro de forma,  $\beta$**

Este parâmetro, como o seu nome indica, define a forma da distribuição, ou seja, a física da falha. Este é o grande responsável pela versatilidade que é característica da distribuição de *Weibull* pois, outras distribuições (que não possuem parâmetro de forma) têm uma forma pré-definida e que não pode ser alterada. Então, com uma simples adequação do valor de  $\beta$ , a distribuição de *Weibull* pode assumir a forma de qualquer outra distribuição e aplicar-se a qualquer fase da vida de um componente. Por exemplo, quando  $\beta=1$ , a função densidade de probabilidade de falha da distribuição de *Weibull* de três parâmetros assume a forma de uma distribuição exponencial:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} e^{-\frac{t-\gamma}{\eta}} \quad (25)$$

A figura 14 demonstra o efeito do parâmetro  $\beta$  na forma da função densidade de probabilidade de falha de um componente.

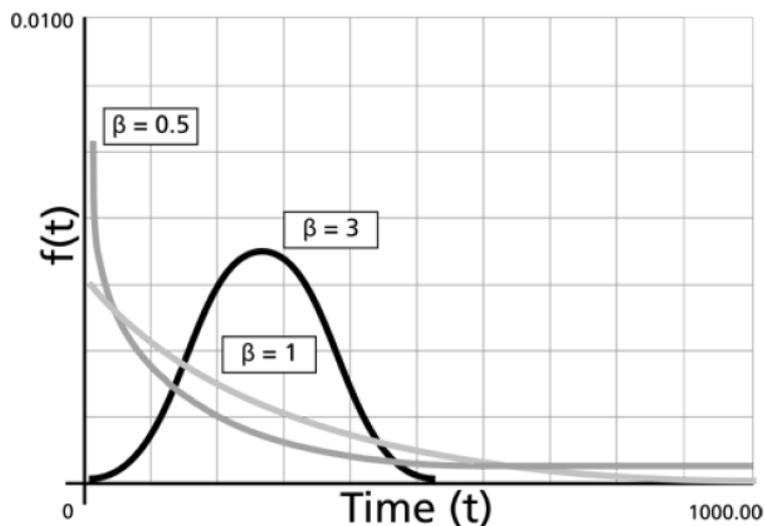


Figura 14 - Efeito da variação do parâmetro de forma na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).

Através de uma análise da figura anterior pode verificar-se que a função densidade de probabilidade de falha pode assumir diversas formas através da flutuação de valores assumidos pelo parâmetro  $\beta$ . Quando este toma valores entre zero e um, verifica-se que  $f(t)$  assume a forma de uma distribuição *Gamma* enquanto que, se tomar valores de aproximadamente 3 e 4  $f(t)$  assumirá a forma de uma de uma distribuição Normal. Pode ainda verificar-se que quando  $\beta$  toma o valor unitário,  $f(t)$  assume a forma de uma distribuição exponencial com  $\lambda = 1/\eta$ .

O valor de  $\beta$  tem desta forma um efeito marcante na taxa de falhas de um componente, podendo definir-se as características de avaria das populações, em função do valor de  $\beta$ , conforme se pode verificar através na figura 15.

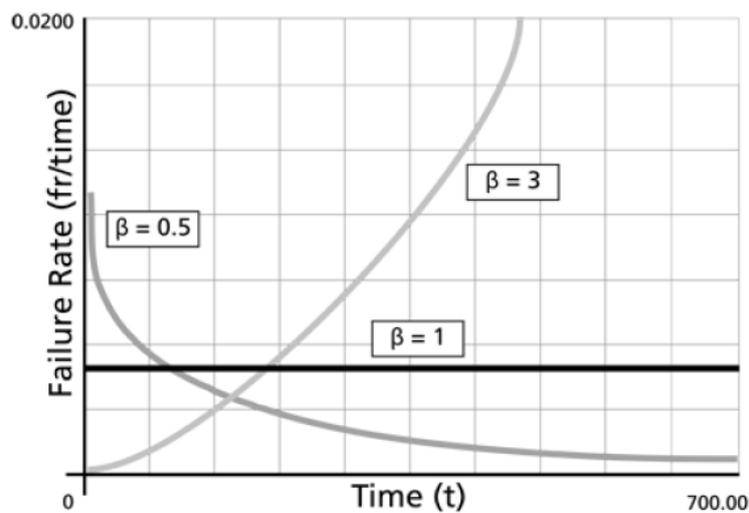


Figura 15 - Efeito da variação do parâmetro de forma na taxa de falhas (Reliasoft, 2014)

Através da análise da figura 15, conclui-se que a distribuição de *Weibull* pode ser adequada a qualquer fase da vida de um componente através da flutuação do seu parâmetro de forma:

- Quando  $\beta$  toma valores entre zero e um, a função da taxa de avarias é decrescente e corresponde ao período de infância.
- Quando  $\beta$  toma o valor unitário, a função da taxa de avarias é constante e corresponde ao período de vida útil.
- Quando  $\beta$  toma valores acima da unidade, a função da taxa de avarias é crescente e corresponde ao período de desgaste.

Uma vez capaz de alterar a função da taxa de avarias com o tempo, é evidente que a flutuação de valores do parâmetro  $\beta$  irá causar também uma alteração na função fiabilidade,  $R(t)$ , como se pode observar na figura 16. Aqui pode confirmar-se a correspondência entre os valores de  $\beta$  e as fases da vida de um componente efetuada anteriormente uma vez que, por exemplo,

quando  $\beta$  toma valores entre zero e um a função de fiabilidade sofre um decréscimo inicial muito acentuado, o que condiz com o período de mortalidade infantil de um componente.

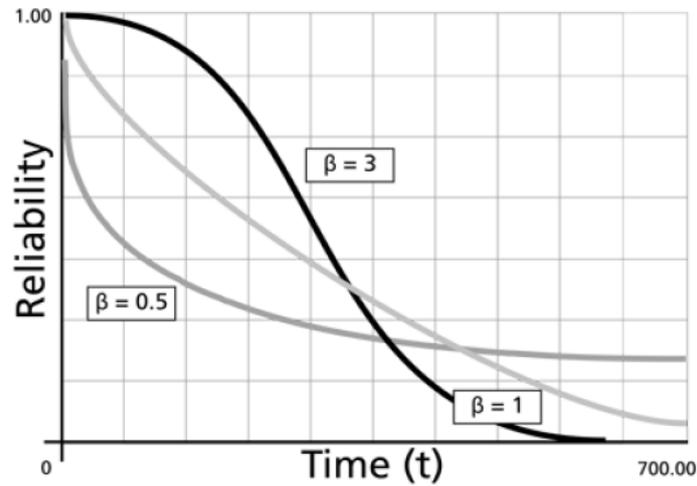


Figura 16 - Efeito da variação do parâmetro de forma na função de fiabilidade (Reliasoft, 2014).

➤ **Parâmetro de escala,  $\eta$**

Também conhecido como “vida característica”, o parâmetro  $\eta$  define o instante em que um dado componente atinge uma probabilidade de falha de 63,2%. Uma alteração do valor deste parâmetro irá provocar o mesmo efeito, na distribuição, que uma alteração do eixo das abcissas.

Na figura seguinte está representado o gráfico da densidade de probabilidade de falha de um componente onde, mantendo o parâmetro  $\beta$ , o parâmetro de escala assume valores distintos.

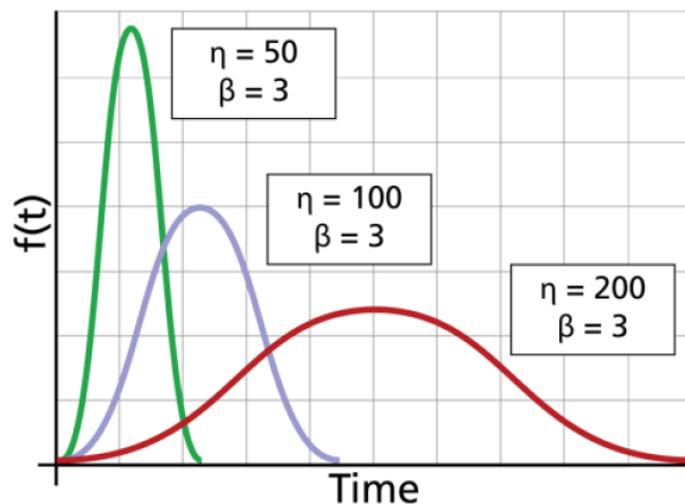


Figura 17 - Efeito da variação do parâmetro de escala na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).

É possível constatar que o valor de  $\eta$  tem o efeito de “esticar” a função densidade de probabilidade de falha. Uma vez que a área sob a mesma é constante, o pico da curva irá diminuir com o aumento do valor do parâmetro  $\eta$ . Pode então afirmar-se que, valores mais elevados de  $\eta$  estão associados a bens mais duráveis e com maiores valores de fiabilidade associados.

➤ **Parâmetro de localização,  $\gamma$**

O parâmetro de localização,  $\gamma$ , como o seu nome indica, localiza a distribuição no eixo das abcissas. Alterar o valor de  $\gamma$  irá provocar um desvio na distribuição, para a direita se  $\gamma > 0$ , e para a esquerda se  $\gamma < 0$ . Na figura 18 é possível observar o efeito da variação deste parâmetro.

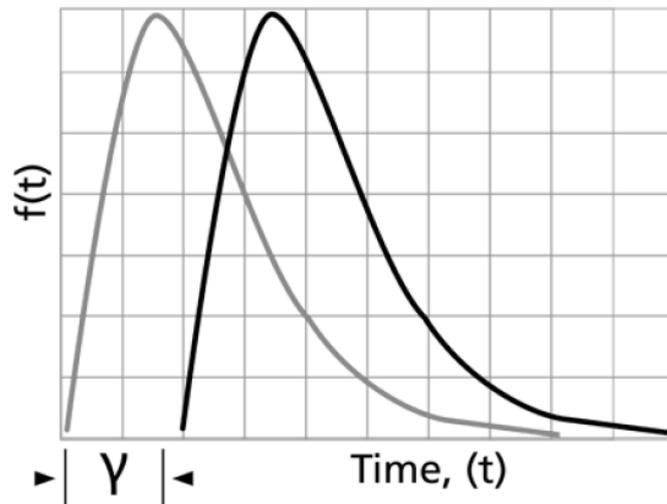


Figura 18 - Efeito da variação do parâmetro de localização na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).

### 3.4.2. Exponencial Negativa

Esta distribuição adequa-se à representação de falhas que ocorrem de forma inesperada ou casuística (característica associada ao período de vida útil). A função densidade de probabilidade de falha desta distribuição é dada pela expressão seguinte:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (26)$$

Onde “ $t$ ” representa o tempo de funcionamento e “ $\lambda$ ” a taxa média de avarias.

A função exponencial negativa possui um único parâmetro: A taxa média de avarias,  $\lambda$ , ou o seu inverso (MTBF). A figura seguinte demonstra a forma assumida por esta função graficamente, bem como a influência do parâmetro  $\lambda$ .

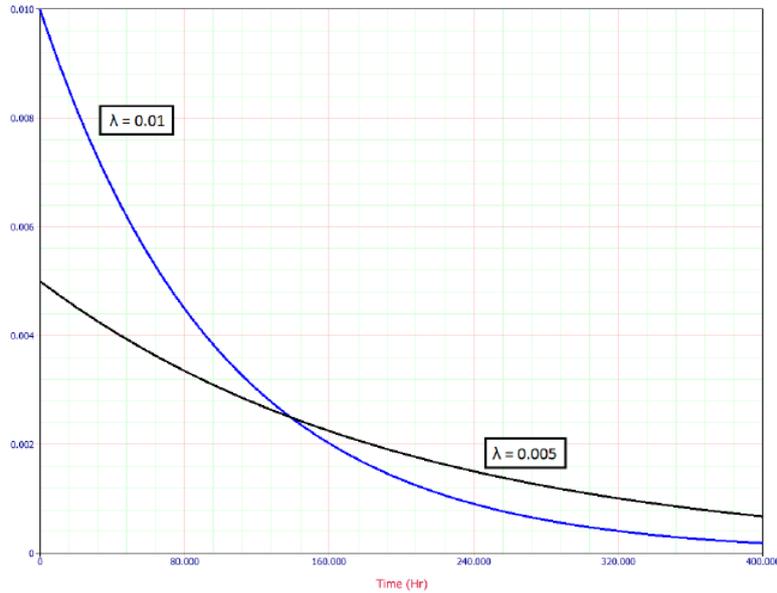


Figura 19 - Efeito da taxa média de falhas na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).

Através da integração da expressão 26 obtém-se a função de probabilidade acumulada de falha,  $F(t)$ :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda.t} \quad (27)$$

O valor de  $t$ , correspondente ao momento em que se terá atingido uma dada probabilidade acumulada de falha,  $F(t)$ , pode ser deduzido a partir da expressão seguinte:

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad (28)$$

### 3.4.3. Normal

A distribuição Normal ajusta satisfatoriamente o comportamento de avarias de uma dada população quando esta atinge o período de desgaste, ou seja, quando a sua taxa de avarias passa a crescer acentuadamente com a idade. Esta é aplicada quando as falhas ocorrem em torno de um valor Medio, de forma simétrica, logo, descreve bem o comportamento de falha quando a degradação se intensifica. A distribuição Normal possui dois parâmetros:

- **Média  $\mu$**  - Parâmetro de localização.

- **Variância ( $\sigma^2$ )** - Parâmetro de escala onde  $\sigma$  representa o desvio padrão.

Neste caso, a função densidade de probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - T_m}{\sigma} \right)^2}, \text{ para } -\infty < t < \infty \quad (29)$$

A figura seguinte representa o gráfico da função densidade de probabilidade de falha obtido através de duas distribuições Normais que apresentam o mesmo valor para a média e onde se pode verificar a influência do desvio padrão nas mesmas.

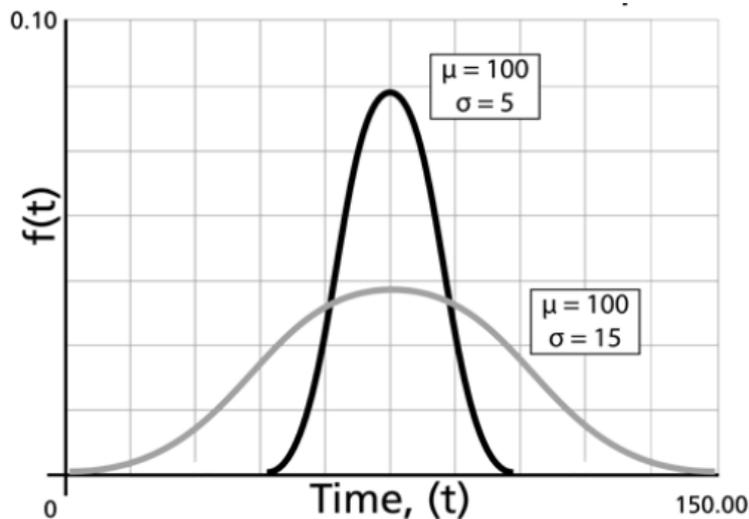


Figura 20 - Efeito da variação do desvio padrão na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014).

Através da análise da figura anterior é possível concluir que, para uma média fixa, o aumento do desvio padrão provoca uma dispersão da densidade de probabilidade de falha ao longo do tempo.

### 3.4.4. Lognormal

Esta distribuição é normalmente utilizada na análise de fiabilidade de componentes mecânicos que apresentam modos de falha por fadiga e apresenta algumas semelhanças com a distribuição Normal. Esta está assente em dois parâmetros ( $\mu'$  e  $\sigma'$ ) sendo a densidade de probabilidade de falha para a mesma dada por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} (t' - \mu')^2} \quad (30)$$

Onde:

- $t'$  -  $\ln(t)$ . Os valores de  $t$  são os valores correspondentes aos TTF's;
- $\mu'$  - Média dos logaritmos naturais dos TTF's;
- $\sigma'$  - Desvio padrão dos logaritmos naturais dos TTF's.

Aqui, a fiabilidade para uma missão  $t$  e que começa no momento zero é determinada por:

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu'}{\sigma'}\right)^2} . dx \quad (31)$$

As figuras 21 e 22 representam o efeito dos dois parâmetros na distribuição:

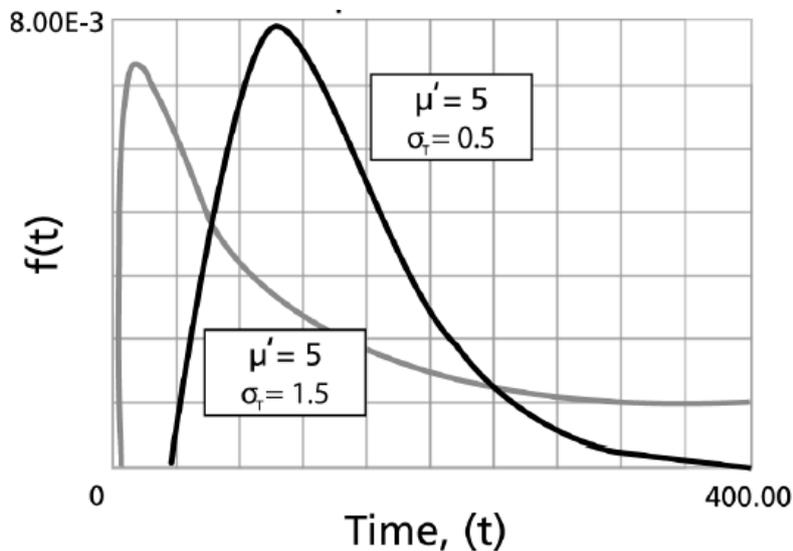


Figura 21 - Efeito da variação do desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores de TTF na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014)

Através da análise da figura 21 conclui-se que, para uma média fixa, o aumento do desvio padrão provoca uma deslocação da densidade de probabilidade para o lado esquerdo do eixo das abcissas, ou seja, o maior volume de falhas situar-se-á num tempo de missão superior.

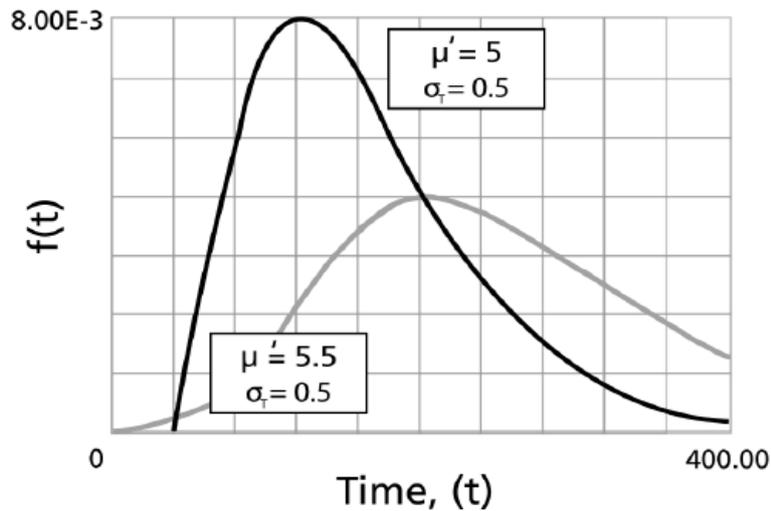


Figura 22 - Efeito da variação da média logarítmica na função densidade de probabilidade de falha (Reliasoft, 2014)

Através da análise da figura anterior pode concluir-se que, para um desvio padrão fixo, o aumento da média provoca uma dispersão da densidade de falhas pelo eixo das abcissas.

### 3.5. Fiabilidade de Sistemas

Em fiabilidade, um sistema é definido como sendo *“Um conjunto de elementos (os componentes do sistema), organizado de um modo logico para o desempenho de uma determinada função”*.

Um sistema é assim constituído por diversos componentes, os quais se podem apresentar dispostos numa lógica série, numa lógica paralelo ou ainda numa lógica combinada do tipo série-paralelo, formando um sistema misto (Carinhas, 2009).

De seguida serão apresentados os principais tipos de sistemas de componentes que podem ser encontrados na indústria, bem como as expressões que permitem o cálculo da fiabilidade dos mesmos.

#### 3.5.1. Sistema de Componentes em Série

Esta é a configuração mais comum em sistemas de Engenharia. Para o sucesso do sistema em série é necessário que todos os componentes estejam a funcionar normalmente, ou seja, é requerido o sucesso de todos os componentes. Sendo por natureza uma composição dotada de uma baixa fiabilidade, a única forma de contrariar este fato é conferindo-lhe redundância, através da introdução de elementos redundantes em paralelo (redundância ativa).

Por vezes existem casos em que não é possível instalar elementos redundantes que operem em simultâneo com o componente primário. Nestes casos, a solução passa por instalar o componente redundante em paralelo passivo, ou seja, este só entra em operação após a ocorrência da falha no componente primário (redundância passiva).

A figura seguinte demonstra o diagrama lógico de um sistema composto por três componentes em série.



Figura 23 – Diagrama de blocos de um sistema de três componentes em série.

A fiabilidade do sistema representado,  $R_{SS}$ , pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R_{SS}(t) = R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot R_C(t) \quad (32)$$

Assim, a probabilidade de falha do sistema,  $F_{SS}$ , é dada por:

$$F_{SS}(t) = 1 - R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot R_C(t) \quad (33)$$

Neste tipo de sistema a taxa de avarias é calculada através da adição da taxa de avarias dos seus componentes:

$$\lambda_{SS}(t) = \lambda_A(t) + \lambda_B(t) + \lambda_C(t) \quad (34)$$

Generalizando as expressões anteriores a um sistema em série composto por  $n$  componentes obtêm-se as seguintes expressões:

$$R_{SS}(t) = \prod_1^n R_i(t) \quad (34)$$

$$F_{SS}(t) = 1 - \prod_1^n (1 - F_i(t)) \quad (35)$$

$$\lambda_{SS} = \sum_1^n \lambda_i \quad (36)$$

### 3.5.2. Sistema de Componentes em Paralelo

Neste caso está representado um sistema em paralelo ativo com três componentes que operam em simultâneo e redundantemente obrigando a que pelo menos um funcione normalmente para garantir o sucesso do sistema.

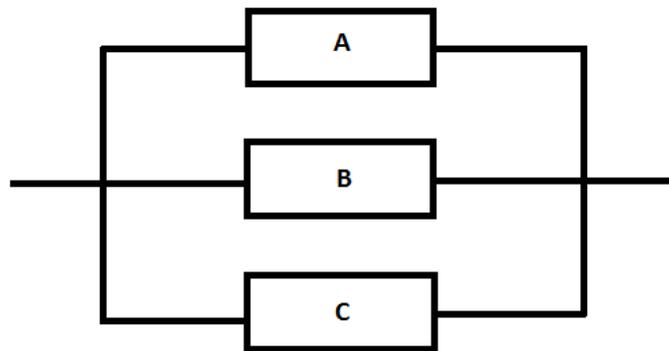


Figura 24 - Diagrama de blocos de um sistema de três componentes em paralelo.

Uma vez que este sistema funciona se A, B ou C funcionarem então, a sua fiabilidade pode ser calculada através da seguinte expressão::

$$R_{SP}(t) = 1 - (1 - R_A(t)).(1 - R_B(t)).(1 - R_C(t)) \quad (37)$$

Então, a probabilidade de falha deste sistema é dada por:

$$F_{SP} = F_A \cdot F_B \cdot F_C \quad (38)$$

Generalizando as expressões anteriores a um sistema composto por  $n$  componentes em paralelo obtêm-se as seguintes expressões:

$$R_{SP}(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (39)$$

$$F_{SP}(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (40)$$

Em sistemas de componentes em paralelo a taxa de avarias não é constante, embora as dos seus componentes possam ser. Neste caso o MTBF não pode ser calculado através do inverso da taxa de avarias do sistema. Por exemplo, no caso particular do MTBF de um sistema paralelo ativo, em que todas as suas  $n$  unidades tenham igual taxa de avarias (i.e.:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$ ), o cálculo é feito através da seguinte equação:

$$MTBF_{SP} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \dots + \frac{1}{n \cdot \lambda} \quad (41)$$

### 3.5.3. Sistema Combinado

Uma vez que cada equipamento possui uma função específica, em meio industrial é mais comum encontrar instalações dispostas em série. No entanto, sistemas em série possuem uma fiabilidade mais baixa pelo que é muito comum que certos elementos, de baixa fiabilidade, sejam acompanhados por elementos redundantes, em paralelo, originando assim sistemas combinados (neste caso série de paralelos).

O sistema série de paralelos possui uma série de  $n$  paralelos, cada um com  $m$  componentes iguais sendo a sua fiabilidade dada pela seguinte expressão:

$$R_{SSP}(t) = [1 - (1 - R_1(t))^m]^n \quad (42)$$

No entanto, embora seja menos usual, também é possível encontrar instalações compostas por iguais séries redundantes com a primeira. A este tipo de instalação dá-se o nome de paralelo de séries, onde se tem um paralelo de  $m$  séries, cada uma com  $n$  componentes em série. A fiabilidade deste sistema é dada pela seguinte expressão:

$$R_{SPS}(t) = 1 - (1 - R_1^n(t))^m \quad (43)$$

### 3.5.4. Sistema de Componentes em paralelo restrito

Também chamado de “sistema  $m$  em  $n$ ” este é um tipo de instalação composta por  $n$  componentes ativos, e onde é requerido que no mínimo  $m$  componentes operem normalmente, para que cumpra a sua missão com sucesso. Na figura seguinte está representado este tipo de sistema.

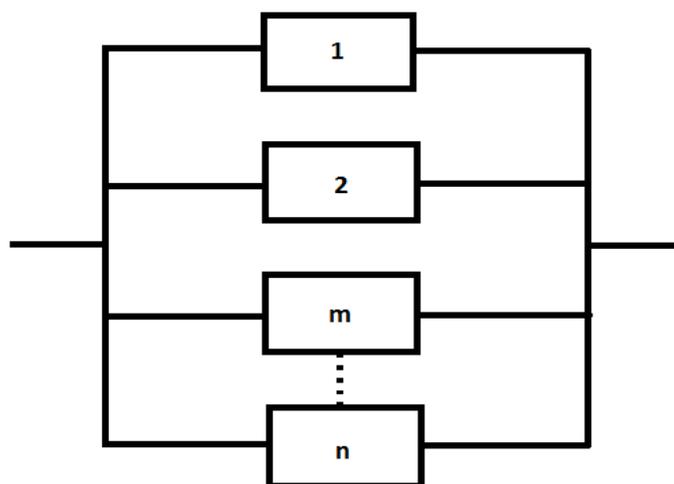


Figura 25 - Diagrama de blocos de sistema de n componentes em paralelo restrito.

Considerando os componentes iguais e independentes, e através da aplicação de uma distribuição binomial, é possível obter a expressão que calcula a fiabilidade destes sistemas:

$$R_{m/n} = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} \cdot R^j \cdot (1 - R)^{n-j} \quad (44)$$

Onde:

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{(n-j)! \cdot j!} \quad (45)$$

$R$  – Fiabilidade do componente.

$R_{m/n}$  – Fiabilidade do sistema.

### 3.5.5. Sistema de Componentes em Standby

Neste tipo de instalação, a função do sistema é assegurada por apenas um componente, permanecendo  $n$  elementos em modo de espera. Caso exista uma falha no componente em funcionamento, entrará outro componente em funcionamento assegurando a disponibilidade do sistema. Assim, o sistema é composto por um total de  $n+1$  elementos, existindo um sensor comutador cuja função será detetar a falha e comutar para outro elemento em standby. Na figura seguinte está representado o diagrama de blocos deste tipo de sistema.

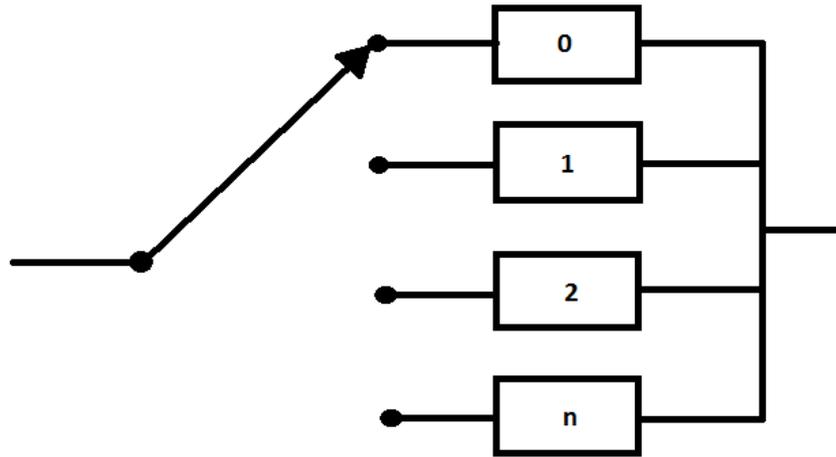


Figura 26 - Diagrama de blocos de um sistema de  $n$  componentes em standby.

A fiabilidade deste tipo de sistema pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$R_{SB}(t) = \sum_{j=0}^n \left[ \left[ \int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right]^j \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt} \right] / j! \quad (46)$$

Onde:

$R_{SB}(t)$  – Fiabilidade do sistema em  $t$

$\lambda(t)$  – Taxa de avarias de cada componente

Se se considerar as taxas de avarias dos componentes que constituem o sistema constantes (i.e.,  $\lambda(t) = \lambda$ ) a expressão anterior toma a seguinte forma:

$$R_{SB}(t) = \sum_{j=0}^n (\lambda \cdot t)^j \cdot e^{-\lambda \cdot t} / j! \quad (47)$$

### 3.6. RCM - Manutenção Centrada na Fiabilidade

Como já foi mencionado, ao longo dos anos a manutenção tem passado por muitas mudanças organizacionais devido à globalização do mercado e às suas crescentes exigências. Uma das

estratégias mais utilizadas para fazer face a este cenário e acrescentar valor ao serviço ou produto é a Manutenção Centrada na Fiabilidade (*Reliability Centered Maintenance* – RCM).

Desenvolvido inicialmente para ser aplicado na indústria aeronáutica comercial dos EUA e posteriormente difundido a nível global, o RCM pode ser definido como um método sistemático para determinar quais devem ser os requisitos de manutenção de forma a assegurar que qualquer equipamento continue a desempenhar as funções requeridas no seu contexto operacional (Assis, 2010).

Basicamente, esta metodologia lida com questões chave que as outras até agora não eram capazes. Esta reconhece que, numa instalação, os equipamentos não têm todos a mesma importância em termos de segurança e económicos. Apesar de ser altamente dependente da manutenção preditiva, o RCM também reconhece a utilização de outros tipos de manutenção:

- <10% Manutenção corretiva
- 25% a 35% Manutenção preventiva
- 45% a 55% Manutenção preditiva

A aplicação deste método envolve a identificação de ações que quando executadas têm o objetivo de reduzir a probabilidade de falha de um equipamento, bem como os seus custos de manutenção.

Segundo Dhillon (1999), esta metodologia tem como finalidade responder a sete questões relacionadas com as necessidades de Manutenção de componentes:

- **Qual a função do equipamento no seu contexto atual?**

A função e performance deve ser definida no seu contexto operacional e a quantificação desta não deve ser demasiado superficial.

- **De que forma falha no cumprimento das suas funções?**

Quando um componente não está nas condições específicas, sendo necessário associar a cada função as falhas funcionais associadas.

- **O que provoca cada falha operacional?**

Identificar as falhas de modo a que possam ser efetuadas análises de causa raiz.

- **O que acontece quando se dá a falha?**

São registadas as consequências dos modos de falha, sendo que este trabalho deve ser executado por pessoal qualificado para que não se tirem conclusões erradas.

- **Qual a importância de cada falha?**

Quantifica-se a importância de cada falha, sendo agrupadas por:

- Falhas que expõem o sistema a riscos graves ou muito graves, mas sem consequências diretas, mais conhecidas por “falhas ocultas”;
- Falhas com consequência de carácter ambiental ou de segurança;
- Falhas com consequência operacional, pois afetam a qualidade do produto, prazos de entrega e custos;
- Falha sem consequência operacional, o único custo associado é da reparação.

- **O que fazer para prevenir a falha?**

Realiza-se uma análise dos possíveis modos de falha para determinar tarefas de manutenção preventivas.

- **O que fazer no caso de não se encontrar uma solução?**

Determina-se através do método RCM a procura de falha e concebe-se um novo método.

Pode então afirmar-se que, enquanto que na manutenção tradicional o foco está no equipamento e prevenção de suas falhas, no RCM o foco está nas funções do equipamento e na prevenção das consequências de falhas.

### **3.7.1. Princípios do RCM**

Esta metodologia está assente em diversos princípios, estando estes referidos de seguida com a respetiva identificação dos seus conceitos. Pode afirmar-se então que o RCM é um método:

- **Orientado para a função:**

Procura preservar a função do sistema ou do equipamento e não apenas a sua operabilidade.

- **Focado no sistema:**

Tem como objetivo a funcionalidade do sistema.

- **Centrado na fiabilidade:**

Através da análise de fiabilidade, procura conhecer as probabilidades de falha em períodos específicos da vida dos componentes.

- **Condicionado ao projeto:**

Tem como objetivo manter a fiabilidade inerente ao projeto atual do equipamento ou sistema.

- **Direcionado para a segurança e economia:**

A segurança deve ser assegurada a todo o custo sendo a redução de custos abordada como segunda prioridade.

- **Orientado para o tratamento de qualquer situação insatisfatória:**

Considera como falha a perda de função de um equipamento ou a não conformidade do processo.

- **Baseado em três tipos de manutenção:**

Combina ações de manutenção preventiva baseada em intervalos de tempo (estipulados através da análise de fiabilidade), condicionada e corretiva.

- **Contínuo:**

Deve ter uma aplicação contínua, de forma a analisar os resultados para melhoria de novos projetos e da estratégia de manutenção.

### **3.7.2. Procedimento do RCM**

Segundo Assis (2010), a Manutenção Centrada na Fiabilidade pode ser executada através de uma metodologia apoiada em 20 passos:

1. A máquina (sistema) é decomposta em grandes blocos funcionais (subsistemas) e suas posições funcionais. Exemplo: O sistema turbina contém uma válvula de admissão esférica (subsistema);
2. Cada subsistema é decomposto em posições funcionais que podem ser substituídos ou reparados. Exemplo: O subsistema válvula de admissão contém um obturador (posição funcional);
3. Cada posição funcional recebe um código;

4. Descrevem-se as funções de cada componente;
5. Identificam-se os diferentes modos de falha possíveis de cada uma das funções descritas na fase anterior.
6. Cada um destes modos de falha recebe um código
7. Cada modo de falha é classificado como sendo evidente ou não pelo(s) operador(es) em condições normais de operação;
8. Cada modo de falha é classificado como sendo sinalizável por meios automáticos ou não;
9. Cada modo de falha é classificado como sendo de natureza “casual” ou “progressiva”;
10. Para cada modo de falha é identificada a causa imediata;
11. Para cada modo de falha são identificadas as consequências “operacionais”, “económicas e/ou de “segurança”;
12. Cada modo de falha é classificado como sendo “critico”, “não critico” ou “potencialmente critico”
13. Para cada modo de falha, seleciona-se uma política de manutenção em função do descrito nas fases anteriores;
14. Para cada modo de falha, analisa-se o seu histórico e determina-se a periodicidade mais adequada ou o calendário mais adequado de inspeções ou, ainda, a alternativa de uma modificação técnica após uma análise de viabilidade económica;
15. Para cada componente, determina-se a frequência com que serão necessárias peças de substituição resultantes das falhas casuais;
16. Para cada componente, regista-se o prazo de aprovisionamento de fornecedores;
17. Para cada componente seleciona-se o nível de serviço desejado da sua gestão em armazém;
18. Para cada componente, determina-se o nível de reposição ou de alerta;
19. Os procedimentos anteriores, a partir do 11º, devem ser revistos periodicamente ou sempre que se verifica uma alteração da importância do equipamento para a empresa;
20. Os procedimentos anteriores, a partir do 14º, devem ser revistos sempre que se verifica uma intervenção de manutenção preventiva (sistemática ou condicionada) ou

uma falha, seguida de uma intervenção de manutenção curativa, pois pode haver lugar à reformulação dos parâmetros das distribuições de probabilidade descritoras dos comportamentos em falha de cada componente crítico.

### **3.7.3. Vantagens e Limitações do RCM**

Segundo US Department of Energy (2010), a implementação esta metodologia representa várias vantagens nomeadamente:

- Menores custos devido à eliminação da manutenção por defeito e manutenção por excesso;
- Menor frequência das revisões;
- Redução da probabilidade de falhas súbitas;
- Foca os esforços de manutenção para os equipamentos críticos;
- Aumenta a fiabilidade do equipamento;
- Incorpora a análise de causa raiz;
- Consegue ser a metodologia de manutenção mais eficiente.

Apesar destas vantagens é também possível identificar as seguintes limitações:

- Custos significativos na sua implementação (formação, aquisição de equipamentos e *softwares*, etc...)
- Potencial de poupança económica podem não ser claros para a gestão.

# Capítulo 4 - Estudo Prático

## 4.1. Introdução e Estrutura do Estudo Prático

Este estudo foi desenvolvido na sequência de um estágio curricular no Departamento de Fiabilidade e Planeamento, pertencente à Direção de Otimização e Manutenção da empresa EDP Produção.

A EDP Produção é uma das empresas pertencentes ao Grupo EDP e foi criada com o intuito de dirigir o seu trabalho para toda a área técnica, logística, de operação e manutenção das centrais de produção de energia elétrica. A EDP explora hoje um dos portfolios de geração mais equilibrados da Península Ibérica considerando o peso significativo da geração hídrica, a eficiência operacional das suas centrais a carvão e a crescente capacidade em centrais de ciclo combinado. A presença em Espanha através da EDP Espanha torna a EDP na primeira empresa a deter ativos significativos de produção de eletricidade em Portugal e Espanha.

Como forma de colocar em prática os conceitos teóricos abordados neste Trabalho Final de Mestrado, nomeadamente a influência dos novos paradigmas de gestão de ativos físicos e o papel da análise de fiabilidade na evolução da prática da manutenção industrial, e coincidindo com o desenvolvimento de projetos piloto de implementação da Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) e Manutenção Baseada no Risco (RBM) nas centrais hidroelétricas do Grupo EDP, este estudo propõe-se a estabelecer o plano de manutenção de um ativo físico, constituinte de uma das mais importantes centrais hidroelétricas no ativo, com recurso à análise de fiabilidade. Por motivos de confidencialidade o nome e localização reais desta central não serão revelados pelo que, para efeitos deste estudo académico, será denominada de Central Hidroelétrica EDP.

Anteriormente ao desenvolvimento deste estudo, e no sentido da implementação das metodologias mencionadas anteriormente, a equipa do Departamento de Fiabilidade e Planeamento estipulou uma subdivisão das centrais hidroelétricas em sistemas, subsistemas e posições funcionais. Esta subdivisão permite direcionar de forma objetiva as análises de fiabilidade e risco a cada grupo de função definido, estabelecendo periodicidades de intervenções preventivas distintas para cada um, otimizando assim as ações de manutenção em cada sistema.

O sistema selecionado para desenvolvimento de um plano de manutenção através da análise de fiabilidade foi uma das quatro turbinas hidráulicas que se encontram em operação na Central Hidroelétrica EDP, a turbina do grupo 2, tendo como critério de seleção a quantidade de ocorrências registadas no seu histórico. Aplicando o estudo ao sistema com mais ocorrências, os resultados podem ser transportados de forma conservativa para os restantes

sistemas semelhantes.

Numa primeira parte é dada a conhecer a Central Hidroelétrica EDP através de uma descrição de todas as suas características e história, bem como o sistema em estudo através de uma breve descrição do tipo de turbina instalada e levantamento dos seus respetivos subsistemas e posições funcionais.

Após a devida apresentação da central, sistema, subsistemas e posições funcionais onde incide o estudo efetuado, segue-se a análise de criticidade. Esta permite selecionar as posições funcionais críticas que serão alvo da análise de fiabilidade e, como tal, de manutenção preventiva. Todas aquelas que forem consideradas não-críticas serão alvo de uma manutenção corretiva.

De seguida é apresentado todo o processo de análise de fiabilidade aos diversos subsistemas. Esta análise é efetuada com recurso ao *software Weibull++ 7* e tem como base o histórico de falhas ocorridas na turbina desde a sua ativação. Através da imposição de um requisito mínimo de fiabilidade, imposto pelos órgãos de gestão da Direção de Otimização e Manutenção da EDP Produção, é possível determinar o tempo máximo de operação (em horas) correspondente à queda de fiabilidade máxima permitida e que irá definir a periodicidade das intervenções preventivas.

A imposição de um intervalo de confiança conservativo à análise efetuada em cada subsistema resulta na determinação de intervalos de tempo cuja fiabilidade mínima requerida pode ser atingida.

Paralelo a todo o processo de análise de fiabilidade, e com vista à melhoria da disponibilidade do sistema em causa, é efetuado um levantamento e posterior análise de Pareto dos modos de falha verificados ao longo do tempo.

Uma última parte consiste no planeamento da manutenção preventiva a efetuar no sistema em causa. Através da otimização das interseções entre os intervalos calculados para cada subsistema é possível conceber vários blocos de intervenções preventivas, onde cada um dispõe de uma periodicidade distinta. Isto permite que as intervenções se dêem apenas nos subsistemas necessários quando necessário, ou seja, a otimização da manutenção no sistema. O plano de manutenção já existente, juntamente com a análise de Pareto dos modos de falha, permite a conclusão do estudo desenvolvido, constituindo a base para a definição das ações de inspeção e manutenção preventiva a efetuar em cada bloco de intervenções.

É de referir que todo o estudo efetuado e apresentado de seguida se trata meramente de um exercício académico que pretende demonstrar as vantagens da implementação dos conceitos da área da Fiabilidade na prática da manutenção industrial, desenvolvendo e apresentando uma metodologia para tal. Todos os resultados e conclusões obtidos estão inteiramente dependentes da fidedignidade do histórico de ocorrências existente e não existe qualquer

garantia da sua integração nas presentes ou futuras práticas de manutenção na central em questão.

## **4.2. A Central Hidroelétrica EDP**

Utilizando um desnível de 57 m existente entre a origem do troço internacional do Douro e a retenção do aproveitamento hídrico imediatamente a jusante, a Central Hidroelétrica EDP é uma central de fio-de-água, possui uma potência total de 362MW e produz em média cerca de 1103 GWh/ano, encontrando-se em funcionamento desde novembro de 1960. Basicamente o aproveitamento compõe-se de barragem, munida na sua parte central de um descarregador de cheias, central subterrânea, edifícios de comando e de descarga e subestação, localizados na margem direita. Situada em Portugal continental, a Central Hidroelétrica EDP constitui uma das mais importantes centrais de produção de energia hidroelétrica do Grupo EDP. A sua barragem cria uma pequena albufeira ao longo de uma extensão de 14 km, com uma capacidade total, ao nível máximo normal de exploração (cota 528m), de 28 milhões de metros cúbicos, dos quais apenas cerca de 6,4 milhões são turbináveis, em exploração normal. Esta barragem, com uma altura máxima de 80 m acima das fundações, é do tipo contrafortes e está equipada, na sua parte central, com quatro vãos descarregadores providos de comportas segmento, os quais no seu conjunto permitem descarregar um máximo de 11000 m<sup>3</sup>/s. A Central, em caverna, tem 80 m de comprimento, 19,6 m de largura e 42,7 m de altura máxima de escavação e é totalmente revestida em betão. Está equipada com três grupos geradores semelhantes (grupos 1, 2 e 3), com uma potência de 60 MW cada, e em funcionamento desde a data de arranque da central e outro mais recente com uma potência de 182 MW (grupo 4).

Cada um dos quatro grupos geradores possui um circuito hidráulico independente abrangendo a tomada de água, localizada imediatamente a montante do encontro direito da barragem, conduta forçada, tubo de aspiração e restituição. Na margem direita, junto do coroamento da barragem, localizam-se o edifício de comando, no qual está centralizada toda a manobra do equipamento electro e hidromecânico e o edifício de descarga, que comunica com a central através de um poço de acesso de 9 m de diâmetro útil e cerca de 63 m de altura. A subestação de transformação está estabelecida numa plataforma, adjacente ao edifício de descarga, possuindo três blocos de três transformadores monofásicos, pertencente aos três grupos mais antigos, e um transformador trifásico para o grupo mais recente.

Uma vez que, para uma análise de fiabilidade apoiada em dados censurados de vida útil, quanto maior for a quantidade de dados de vida maior será a precisão dos resultados, a turbina selecionada para a realização deste estudo foi a do grupo 2 uma vez que este é o que conta com mais horas de operação acumuladas, tendo um total de 272494 horas de funcionamento e maior número de dados de ocorrências. Posto isto, e sendo as turbinas dos grupos 1, 2 e 3 exatamente iguais, ao ser analisado o grupo mais crítico os resultados da análise poderão

abranger os grupos 1 e 2. O grupo 4, por ser muito recente, não tem ainda dados suficientes para uma análise de fiabilidade bem sustentada.

Para efeitos da implementação do RCM, as Centrais Hidroelétricas pertencentes ao grupo EDP foram subdivididas em sistemas que por sua vez são subdivididos em subsistemas e sendo estes ainda subdivididos em posições funcionais. Por exemplo: A cuba é uma posição funcional da chumaceira guia (subsistema) da turbina (sistema).

Esta lógica de organização dos ativos físicos nas centrais visa a otimização das ações preventivas de inspeção e manutenção. Por exemplo, no sistema “Turbina”, existem diversos grupos de componentes mecânicos que conservam funções, requisitos logísticos e disponibilidade completamente distintos. Com esta subdivisão é possível intervir apenas nos grupos necessários, quando necessário, evitando a manutenção por excesso nos grupos de componentes com fiabilidade mais elevada e vice-versa. Assim, a análise de fiabilidade é direcionada aos subsistemas e não componente a componente.

Os sistemas que constituem os grupos geradores desta central são os seguintes:

- Tomada de água;
- Restituição;
- Turbina;
- Alternador;
- Transformador;
- Regulação;
- Frenagem e elevação do rotor;
- Refrigeração;
- Alimentação;
- Subestação e parque de linhas;
- Sistema de segurança;
- Edifícios;
- Barragem;
- Descarregadores de cheias;

- Sistemas de bombagem da Central.

Na figura 27 está representada uma ilustração do corte transversal dos grupos geradores da Central Hidroelétrica EDP onde se pode observar os seus sistemas principais:

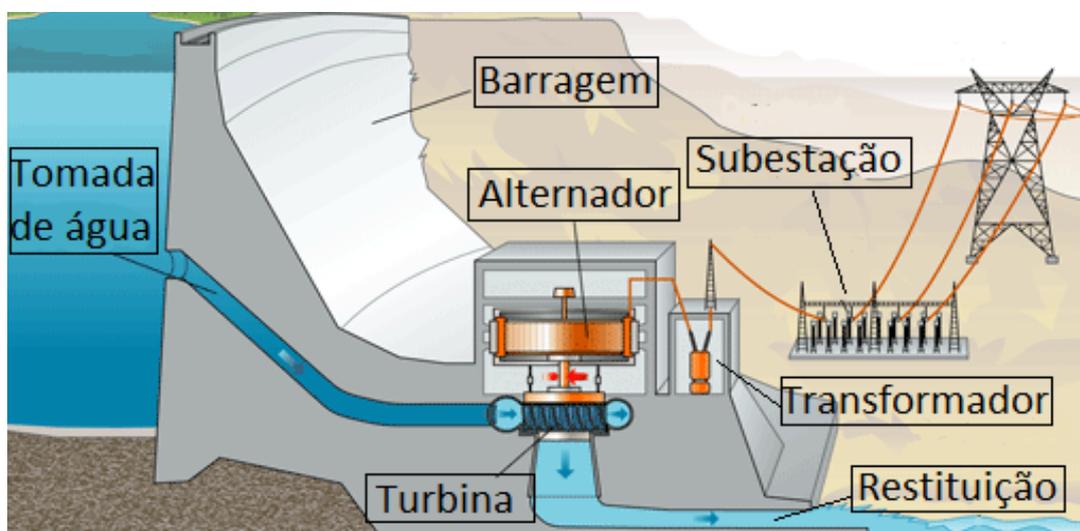


Figura 27 - Representação do corte transversal de um grupo gerador hídrico.

A informação relativa à exploração do grupo 2 da central Hidroelétrica EDP (horas de funcionamento por ano) encontra-se no Anexo A.

### 4.3. Turbina hidráulica *Francis* de eixo vertical

Entende-se por turbina toda a máquina que converte a energia de uma corrente de fluido em energia mecânica, através de um sistema de pás, fixas ou móveis, fazendo-as rodar em torno de um eixo. Estas têm uma larga aplicação na geração de energia elétrica em grande ou pequena escala, em propulsão a jato de aeronaves, motores de navios, etc.

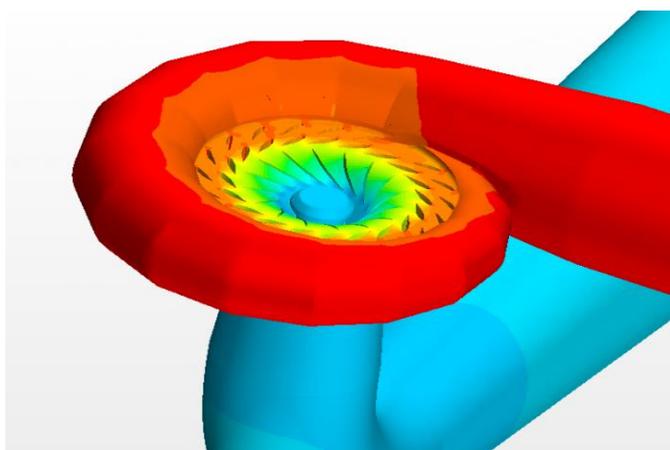
No caso particular das turbinas hidráulicas o fluido é sempre a água. Estas são muito utilizadas na produção de energia hidroelétrica e necessitam de uma manutenção periódica pois sofrem desgaste devido à ação da água, deixando em alguns casos de funcionar com rentabilidade, submetendo-se a uma operação de desmontagem e substituição. As turbinas hidráulicas utilizadas nas centrais transformam em energia mecânica a energia cinética presente no fluxo de água e tornam-na disponível num eixo, ao qual é ligado o rotor de um alternador.

Existem vários modelos de turbinas hidráulicas, sendo os três principais: as *Pelton*, as *Kaplan* e as *Francis*. As turbinas *Francis* são turbinas de fluxo radial e constituem o modelo mais utilizado na produção de energia hidroelétrica em Portugal. Neste modelo de turbina a água sob pressão entra num condutor em espiral, com diâmetro convergente, que circunda as pás móveis do rotor e flui através das pás fixas do distribuidor na direção radial para o interior da

turbina. Desta forma a água passa pelo rotor no sentido descendente, exercendo a pressão nas pás móveis do mesmo e assim provocando o movimento de rotação desejado. Este modelo de turbina pode ser instalado com eixo vertical ou horizontal (sendo o primeiro muito mais comum) e é bastante versátil, sendo aplicável a instalações com alturas de queda desde os 10 m até cerca de 250 m.

O controlo do fluxo de água que entra na turbina é exercido pelas pás fixas do distribuidor que podem ser ajustadas consoante a produção que se pretende em determinado momento.

A figura seguinte representa o funcionamento de uma turbina *Francis* de eixo vertical. Aqui pode identificar-se, a vermelho, a conduta em espiral de diâmetro convergente de admissão de água ao rotor, onde se verifica uma pressão bastante elevada e, a azul, a conduta de restituição de diâmetro divergente, onde se verifica um caudal já turbinado com pressão bastante inferior. No rotor verifica-se a mudança da cor vermelha para a cor azul, passando pela cor laranja e amarela, o que sugere diminuição da pressão da água ao longo da sua passagem pela mesma.



*Figura 28* - Fluxo hidráulico numa turbina *Francis* de eixo vertical.

A turbina hidráulica do grupo 2 da Central Hidroelétrica EDP é uma turbina *Francis* de eixo vertical, projetada para uma queda de 53 m, com 58,840 MW de potência e uma velocidade de rotação normal de 150 R.P.M., sendo considerada como um sistema da central. Esta por sua vez está subdividida em nove subsistemas, nomeadamente:

### **Subsistema 1 – Rotor**

O rotor da turbina é o componente mecânico responsável por transformar a energia cinética da água em energia mecânica através da rotação em torno do seu eixo. Esta é uma peça única, em aço de alta resistência, constituída por uma coroa interior, vinte pás e uma banda exterior. Neste subsistema, para além do rotor, é incluído também o cone divergente de aperto. A tabela

5 refere as posições funcionais presentes neste subsistema bem como a sua função e modos de falha associados:

Tabela 5 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 1.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Coroa	Sustentação/ Fixação interior das pás e ligação ao veio.	Erosão; Cavitação; Fadiga; Corrosão;
20 Pás	Aproveitamento do caudal para gerar movimento de rotação	Erosão; Cavitação; Fadiga; Corrosão;
Banda	Sustentação/ Fixação exterior das pás	Erosão; Cavitação; Fadiga; Corrosão;
Cone de aperto	Fixação da turbina na direção axial; Diminuição do vórtice criado pela passagem da água	Desaperto; Corrosão; Fadiga

Na figura 29 é possível visualizar uma imagem do rotor pertencente a uma turbina semelhante à presentemente em estudo. Não foi possível obter quaisquer imagens do rotor da turbina em estudo pois não ocorreu nenhuma revisão à mesma durante o período de realização deste TFM.



*Figura 29 - Rotor de uma turbina hidráulica Francis.*

## Subsistema 2 - Junta de estanqueidade

Este subsistema é constituído pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela selagem do circuito hidráulico na turbina.

Cada uma das suas posições funcionais bem como a sua função e modos de falha associados estão descritos na tabela 6:

Tabela 6 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 2.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Anel de desgaste	Fixação ao veio	Desgaste
Anel porta juntas	Suporte da junta	Desgaste; Sobreaquecimento; Fadiga
Coroa de guiamento	Guiamento da junta	Corrosão; Desapertos
Molas de compressão da vedação da junta axial	Compressão da junta axial	Fadiga; Corrosão
Servomotor de vedação da junta axial	Vedação da junta axial	Sobreaquecimento; Colmatação; Fadiga; Desgaste; Contaminação do óleo

## Subsistema 3 - Linha de veios

A linha de veios é o subsistema constituído pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela transmissão da energia mecânica, gerada pela turbina, ao rotor do alternador. Este é limitado na extremidade superior do acoplamento ficando o veio do alternador a pertencer ao sistema "Alternador".

A tabela 7 faz referência a cada uma das posições funcionais que constituem este subsistema, bem como as suas funções e modos de falha associados.

Tabela 7 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 3.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Veio	Transmissão da energia mecânica	Corrosão; fadiga; Desgaste
Acoplamento	Ligação entre o veio da turbina e o veio do alternador	Fadiga; Corrosão; Desapertos

#### **Subsistema 4 – Chumaceira Guia**

Este subsistema é composto por uma chumaceira radial de escorregamento, responsável pela fixação radial do veio de transmissão. Devido à sua importância, dimensão e ao facto de as suas peças serem substituídas quando em falha, este componente é considerado um subsistema da turbina sendo essas peças as posições funcionais. Pelo contrário, no caso das chumaceiras das pás-guia do subsistema “Distribuidor”, quando se verifica uma falha é substituída toda a chumaceira pelo que estas são consideradas posições funcionais.

A tabela 8 faz referência a cada uma das posições funcionais presentes neste subsistema, bem como a sua função e modos de falha associados:

Tabela 8 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 4.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
8 Segmentos radiais	Garantir o movimento de rotação do veio através de escorregamento	Desgaste; Fadiga; Corrosão; Sobreaquecimento
Cuba	Armazenamento do óleo	Desapertos; Fugas; Corrosão; Fadiga
Labirinto	Vedação do óleo	Desgaste; Fadiga
Óleo	Lubrificação das superfícies com movimento relativo de escorregamento.	Oxidação; Acidez; Contaminação por partículas
Visor de nível de óleo	Visualização do nível de óleo	Falha do contacto; Prisão da boia

Na figura 30 é possível visualizar a chumaceira guia da turbina em estudo com o grupo em funcionamento.



Figura 30 - Chumaceira guia da turbina em estudo.

#### **Subsistema 5 - Sistema de refrigeração da chumaceira guia**

Este subsistema é composto pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela regulação da temperatura na chumaceira guia. Este é considerado à parte do subsistema “Chumaceira Guia” uma vez que as intervenções de manutenção podem ser realizadas a cada um deles de forma independente.

A tabela 9 refere as posições funcionais pertencentes a este subsistema, bem como a sua função e modos de falha associados:

Tabela 9 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 5.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Cárter	Armazenamento do óleo	Fugas; Corrosão; Fadiga
Permutador	Refrigeração do óleo	Fadiga; Corrosão; Erosão; Desgaste; Colmatação
Caudalímetro	Deteção/sinalização do caudal da água de refrigeração	Rotura de membrana

### Subsistema 6 – Chumaceira de impulso

Este subsistema é composto por uma chumaceira axial de escorregamento e é responsável pelo suporte/fixação axial do grupo. À semelhança da chumaceira guia este componente é considerado um subsistema da turbina.

Tabela 10 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 6.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
8 Patins axiais	Suporte axial do rotor (turbina/alternador) e garantir o movimento de rotação através do escorregamento.	Desgaste; Fadiga; Corrosão
Cuba	Armazenamento do óleo	Desapertos; fugas; corrosão
Óleo	Lubrificação	Oxidação; Acidez; Contaminação por partículas
Disco de impulso axial	Suporte axial do rotor (turbina/alternador)	Fadiga; Desgaste; Corrosão
Molas	Apoio/sustentação dos patins axiais e controlo do esforço axial.	Fadiga; Corrosão
Visor de nível de óleo	Visualização do nível de óleo	Falha do contacto; Prisão da boia

Durante a realização deste estudo foi impossível captar imagens reais da chumaceira em questão.

### Subsistema 7 – Sistema de refrigeração da chumaceira de impulso.

Este subsistema é composto pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela regulação da temperatura na chumaceira de impulso. Este é semelhante ao sistema de refrigeração da chumaceira guia e é considerado um subsistema pelas mesmas razões.

Tabela 11 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 7.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Carter	Armazenamento do óleo	Fugas; Corrosão; Fadiga
Permutador	Refrigeração do óleo	Fadiga; Corrosão; Erosão; Desgaste; Colmatação
Caudalímetro	Deteção/sinalização do caudal da água de refrigeração	Rotura de membrana

### **Subsistema 8 – Distribuidor**

O Distribuidor é o subsistema constituído pelas posições funcionais responsáveis pela regulação do fluxo de água que afluí às pás do rotor da turbina. O bom funcionamento deste subsistema é fulcral para o bom funcionamento da central uma vez que é através da sua operação que é possível regular a produção de energia conforme os requisitos em tempo real.

Tabela 12 - *Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 8.*

<b>Posição funcional</b>	<b>Função</b>	<b>Modos de falha</b>
Anel de comando	Movimentação das pás guia (cadeia cinemática)	Desgaste; Fadiga; Corrosão
Guiamento do anel de comando	Movimentação das pás guia (cadeia cinemática)	Desgaste; Fadiga; Corrosão
20 Pás diretrizes (Pás guia)	Regulação do caudal de admissão	Desgaste; Fadiga; Corrosão; Erosão
20 Chumaceiras superiores das pás diretrizes	Fixação das pás diretrizes	Desgaste; Fadiga; Corrosão; Desapertos
20 Chumaceiras inferiores das pás diretrizes	Fixação das pás diretrizes	Desgaste; Fadiga; Corrosão; Desapertos

A figura 31 representa uma ilustração de um distribuidor *Francis*, idêntico ao da turbina em estudo, onde se podem visualizar os seus componentes. Ao subsistema em questão apenas pertencem os componentes a cinzento sendo que os restantes (vermelhos e azuis) pertencem ao subsistema “Sistema de acionamento do distribuidor”.

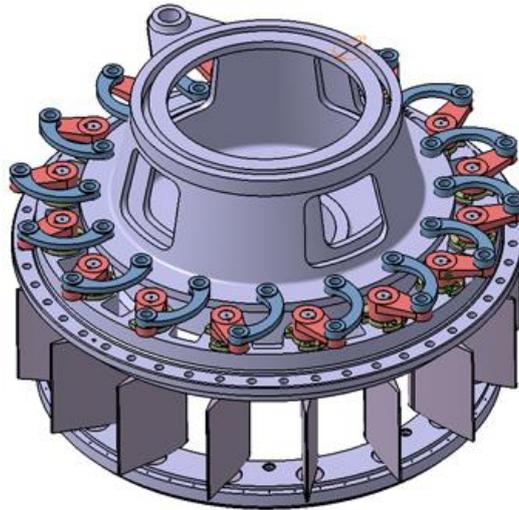


Figura 31 - Representação do distribuidor de uma turbina Francis.

### Subsistema 9 – sistema de acionamento do distribuidor

Este é o subsistema responsável pela movimentação das pás-guia do distribuidor. Este encontra-se separado do subsistema “Distribuidor” devido ao facto de que, pela sua localização, ser possível realizar intervenções nos mesmos de forma independente.

Tabela 13 - Posições funcionais e respetivos modos de falha no subsistema 9

Posição funcional	Função	Modos de falha
20 Bielas	Movimentação das pás guia (cadeia cinemática)	Fadiga; Corrosão; Desgaste
20 Manivelas	Movimentação das pás guia (cadeia cinemática)	Fadiga; Corrosão; Desgaste
2 Servomotores	Geração da força necessária á movimentação das pás guia.	Sobreaquecimento; Colmatação; Fadiga; Desgaste; Contaminação do óleo

A figura 32 representa o corte transversal de uma turbina Francis de eixo vertical, idêntica à turbina em estudo e com a devida localização dos seus subsistemas.

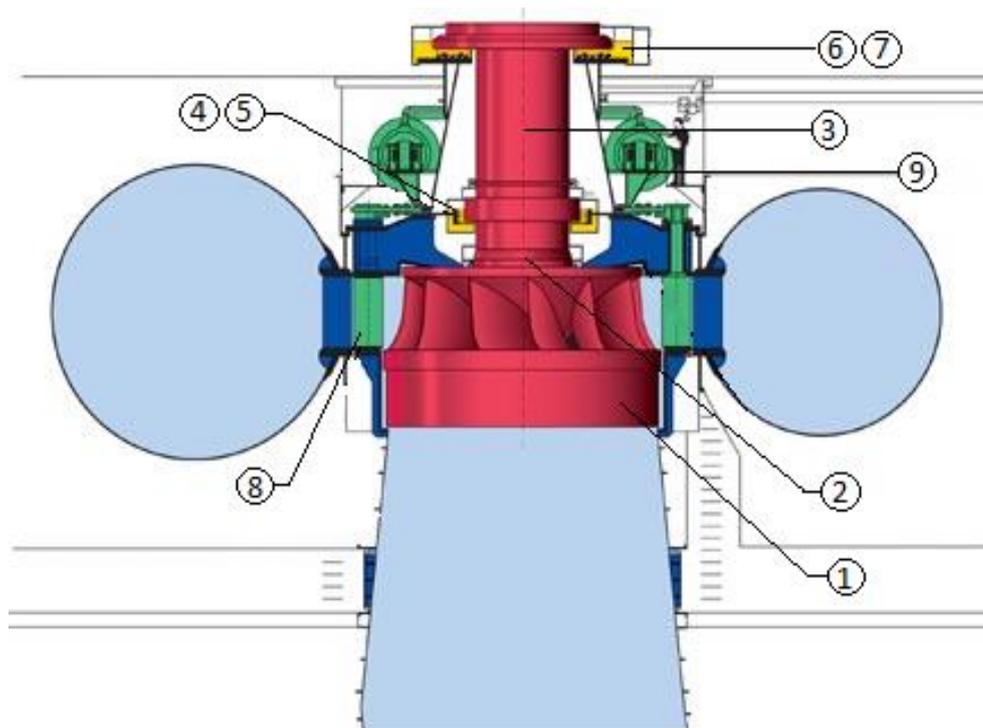


Figura 32 - Representação do corte transversal de uma turbina *Francis* e identificação dos respetivos subsistemas.

#### 4.4. Análise de criticidade às posições funcionais

Como foi mencionado no subcapítulo 3.6., do presente trabalho, na metodologia RCM a manutenção preventiva só é aplicada às posições funcionais consideradas como críticas, sendo as não-críticas alvo de uma manutenção corretiva. Assim a análise de fiabilidade aos subsistemas só contempla as posições funcionais críticas onde a falha em qualquer uma das mesmas representa uma falha no respetivo subsistema.

Previamente a este estudo, a equipa do Departamento de Fiabilidade e Planeamento desenvolveu a sua própria metodologia de análise de criticidade que consiste em responder, para cada posição funcional, a um conjunto de questões de resposta direta (Sim ou Não), estruturadas com base em requisitos de produção, segurança, ambiente e custos de manutenção não programada (ex: A falha da posição funcional origina o disparo do grupo?). Assim, só serão consideradas como não-críticas as posições funcionais às quais todas as questões sejam respondidas negativamente.

Uma vez que as questões que constituem o processo de análise de criticidade às posições funcionais possuem informação confidencial, nomeadamente requisitos estratégicos de produção aplicados às centrais hidroelétricas do Grupo EDP, apenas serão revelados os respetivos resultados da mesma.

**Todas as posições funcionais pertencentes ao sistema “Turbina” foram consideradas como críticas mediante o processo de análise de criticidade desenvolvido internamente pelo Departamento de Fiabilidade e Planeamento da EDP Produção (esta análise encontra-se no Anexo B).**

#### **4.5. Análise de Fiabilidade aos Subsistemas – Procedimento**

Desde o início do ano 1961 que, na Central Hidroelétrica EDP, todas as ocorrências ao nível do funcionamento dos equipamentos têm vindo a ser registadas o que permitiu criar uma base de dados sólida para a análise de fiabilidade dos sistemas constituintes da mesma. Assim o primeiro passo, dado no sentido de desenvolver uma análise de fiabilidade no sistema “Turbina” do grupo 2, foi o tratamento dos dados de ocorrências de modo a isolar o histórico completo de falhas da turbina do mesmo. Neste histórico é possível discernir qual o subsistema em falha, ano da falha, horas de funcionamento acumuladas, componente em falha e modo de falha ocorrido. Este documento encontra-se no Anexo C.

Após a obtenção do histórico de falhas da turbina do grupo 2, foi necessário o isolamento dos dados de falha de cada subsistema em específico no sentido de obter o histórico de falhas por subsistema. Estes históricos serão apresentados adiante, nos subcapítulos referentes aos resultados das análises de fiabilidade e Pareto de cada um dos subsistemas, e apresentam para cada falha, para além do que foi mencionado anteriormente, os tempos entre falhas (TTF’s) e tempo até à suspensão (TTS) necessários a uma análise de fiabilidade apoiada em dados de vida útil censurados à direita.

O passo seguinte foi transportar os TTF’s e TTS de cada um dos subsistemas para o *software Reliasoft Weibull ++7* através da seleção prévia da opção relativa à análise de dados de vida útil censurados à direita. Nas figuras 35 e 36 pode visualizar-se o momento da escolha desta opção e a inserção dos TTF’s e TTS de um dos subsistemas (a título de exemplo), respetivamente.

Após a inserção dos dados de falha do subsistema em análise foi necessário definir o método estatístico a ser utilizado na estimativa dos parâmetros de fiabilidade de cada um dos subsistemas.

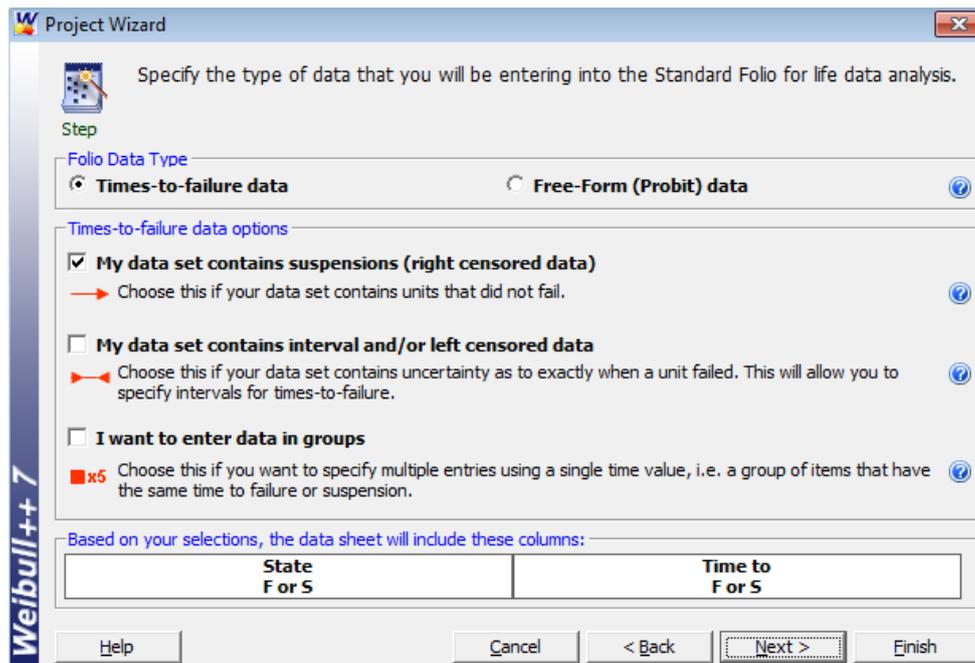


Figura 33 - Seleção da opção de análise de vida útil com dados censurados à direita no software Weibull ++7

	State F or S	Time to F or S	Subset ID
1	F	42798	4
2	F	19675	4
3	F	87688	4
4	F	4785	4
5	F	38674	4
6	F	70274	4
7	S	8600	4
8			

Figura 34 - Inserção de dados de vida útil no software Weibull ++7.

Segundo a Reliasoft (2014), de um ponto de vista estatístico, o método *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) é considerado o mais robusto de todos os métodos de estimativa de parâmetros de fiabilidade. A ideia básica implícita na aplicação deste método é a de obter os valores mais prováveis dos parâmetros, para uma dada distribuição, e que melhor descrevem o conjunto de dados. Então é necessário selecionar previamente esta opção no software, no canto inferior direito da interface, como demonstra a figura 35.

Também foi necessário averiguar qual a distribuição de probabilidades que melhor se adequa aos dados de vida útil de cada um dos subsistemas em análise

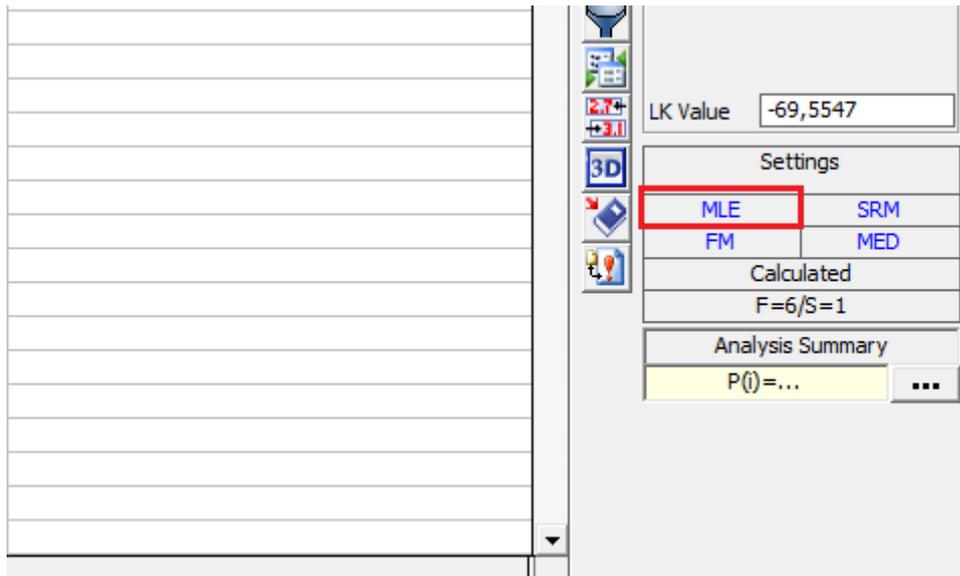


Figura 35 - Seleção do método “MLE” no software Weibull ++ 7.

Foi então necessário utilizar a ferramenta “*Distribution Wizard*” que fornece um *ranking* entre distribuições previamente selecionadas (neste caso foram selecionadas apenas as distribuições estudadas neste TFM, sendo estas as distribuições *Weibull*, Normal, exponencial e lognormal). A figura seguinte representa um exemplo da utilização desta ferramenta.

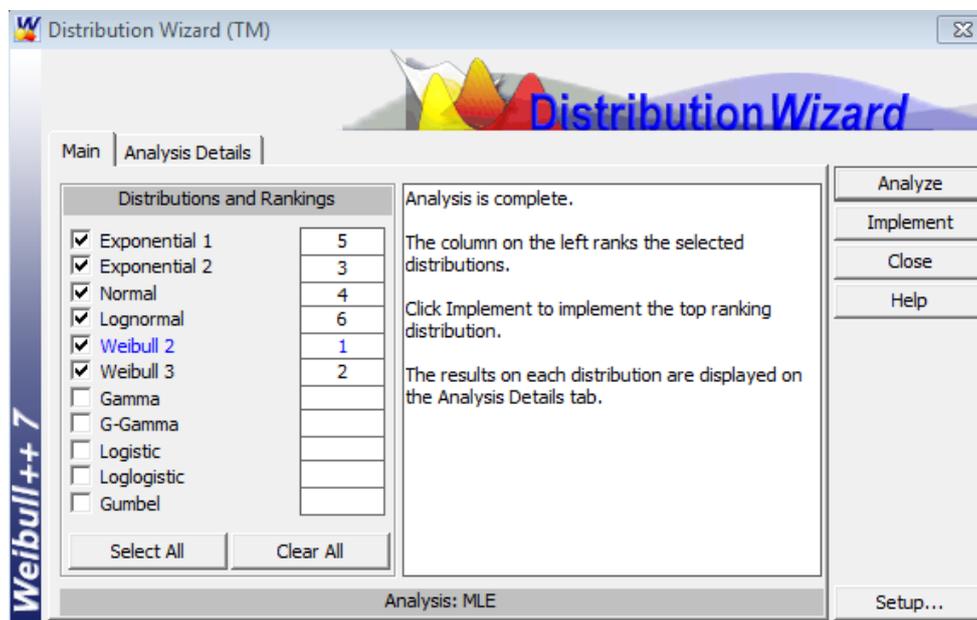


Figura 36 - Utilização da ferramenta “*Distribution Wizard*” no software Weibull ++ 7.

Uma vez definida a distribuição que melhor descreve os dados de vida útil de cada subsistema ficaram reunidas todas as condições para a obtenção dos resultados relativos ao comportamento fiabilístico dos mesmos. A obtenção dos parâmetros de fiabilidade é conseguida através da utilização da ferramenta “*Calculate*”, como demonstra a seguinte figura.



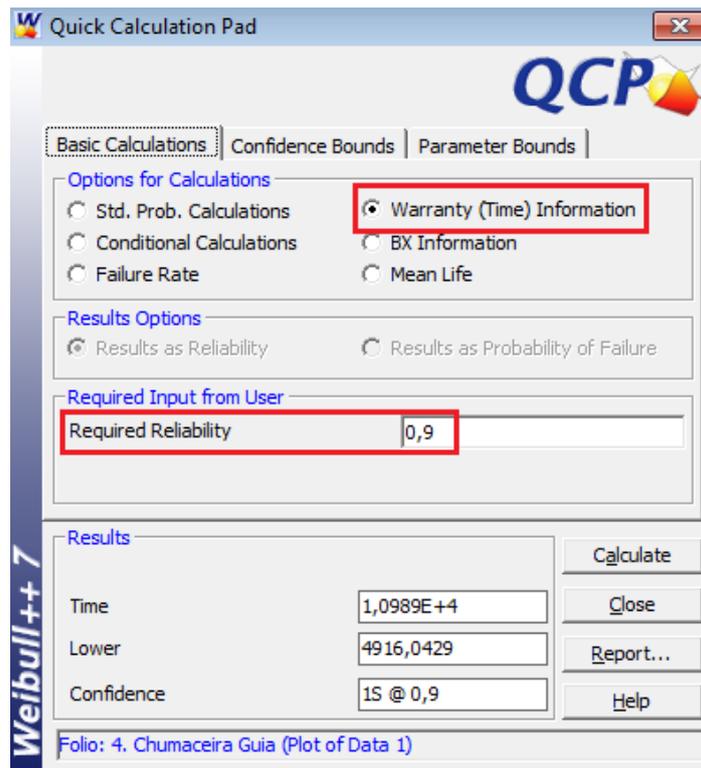


Figura 38 - Utilização da ferramenta “Quick Calculation Pad” no software Weibull ++ 7.

Este intervalo de confiança foi aplicado ao tempo para uma dada fiabilidade (tipo 1), uma vez que o que se pretende obter é o limite mínimo e máximo de tempo de operação correspondente a uma queda da fiabilidade dos subsistemas para 90%.

Assim foi possível obter um intervalo de tempo de operação (em horas) para cada subsistema bastante conservativo, onde o seu limite superior se situa no resultado da análise sem a aplicação de intervalos de confiança.

A figura 39 representa a utilização da ferramenta “Confidence Bounds”, onde se seleciona as opções “Bottom One-Sided”, “Time (Type I)” e valor 90%.

Após a devida especificação do intervalo de confiança a ser aplicado à função, obtiveram-se os gráficos que relacionam a fiabilidade  $R(t)$  dos subsistemas com o tempo de operação em horas, respetivamente. A figura 40 representa, a título de exemplo, um gráfico de um dos subsistemas onde é possível visualizar a linha (a vermelho) que define o limite inferior de um intervalo de confiança de 90% e a linha média (a azul) que neste caso representa o limite superior.

Uma vez finalizada esta operação para todos os subsistemas é possível passar para a fase seguinte deste estudo que visa a otimização da periodicidade das intervenções preventivas ao sistema “Turbina” do grupo 2 desta central hidroelétrica e que irá abranger os sistemas correspondentes dos grupos idênticos da mesma (grupos 1 e 3).

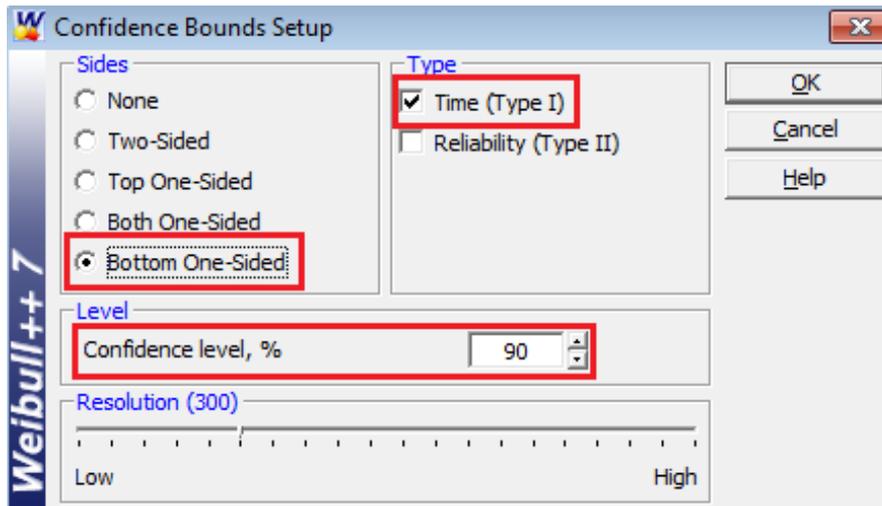


Figura 39 - Utilização da ferramenta “Confidence Bounds” no software Weibull ++ 7.

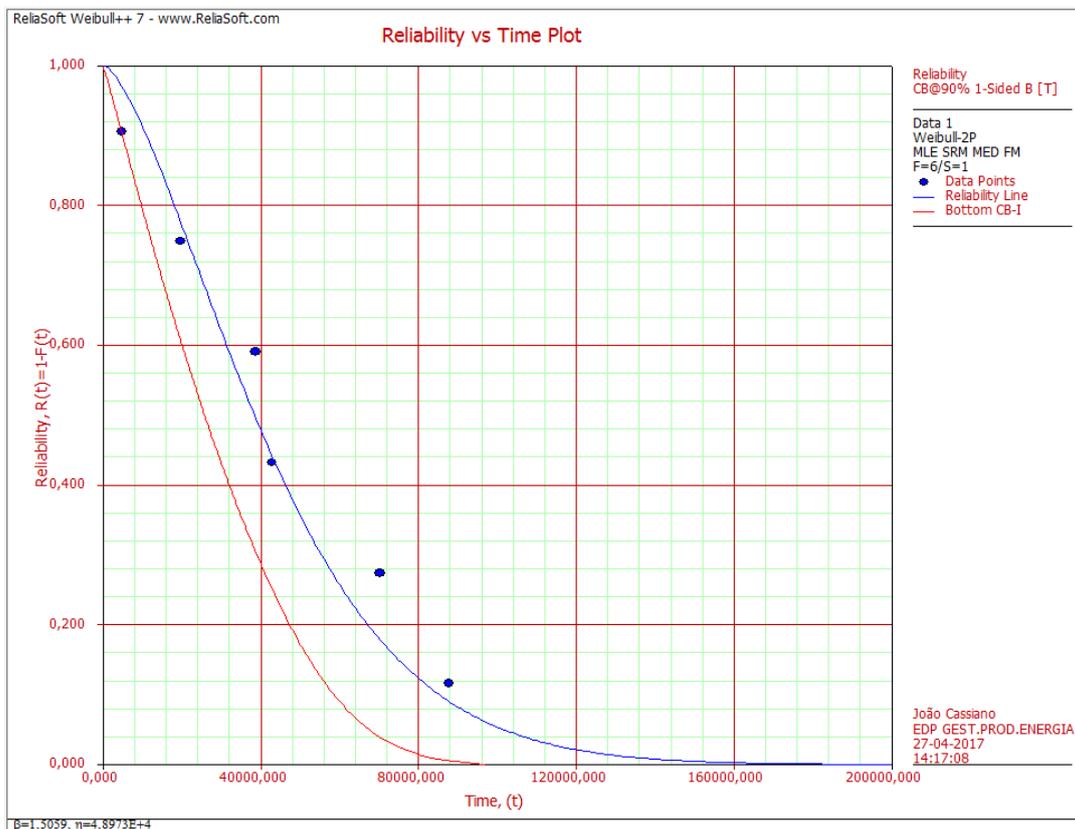


Figura 40 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação (em horas) com intervalo de confiança unilateral inferior de 90%.

#### 4.5.1. Resultados da Análise de Fiabilidade aos Subsistemas

De seguida serão apresentados todos os resultados necessários ao planeamento da manutenção aos nove subsistemas em estudo, obtidos através de uma análise de fiabilidade. Paralelamente à apresentação destes resultados é também apresentado um ranking dos modos de falha mais incidentes em cada subsistema e, posteriormente, uma análise de Pareto aos modos de falha do sistema “Turbina”. Este processo terá bastante utilidade pois permitirá estabelecer medidas de mitigação dos mesmos e adicioná-las ao plano de manutenção do sistema “Turbina”. Assim ir-se-á conseguir uma melhoria significativa do comportamento do sistema quanto à sua fiabilidade. Para efeitos de apresentação de resultados, os valores dos parâmetros de fiabilidade serão apresentados com quatro casas decimais e os valores em horas arredondados às dezenas.

##### 4.5.1.1. Resultados da Análise ao Subsistema 1 – “Rotor”

Este subsistema é característico de uma disponibilidade bastante elevada quando o projeto e operação do grupo gerador se encontra em conformidade com as suas especificações e requisitos de projeto.

A tabela 14 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 14 - *Histórico de falhas do subsistema 1.*

Histórico de falhas - Rotor					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF e TTS	Componente	Modo de falha
F	1974	67987	67987	Rotor	Vibração*
F	1988	188211	120224	Pás	Erosão/ Cavitação
F	2015	266556	78345	Pás 12; 15	Fadiga
S	2016	272494	5938	x	x

*\*Vibração excessiva detectada no rotor. Vibração não constitui um modo de falha, mas sim uma causa e pode originar o disparo de grupo caso ultrapasse os limites de alarme.*

Através da análise deste histórico pode confirmar-se a elevada disponibilidade deste subsistema que, em cinquenta e cinco anos de operação apresenta apenas três falhas funcionais. Devido à elevada resistência dos materiais que constituem os componentes deste subsistema e às características da sua operação, os modos de falha que se observam são sempre de degradação (ou deriva). A tabela 15 estabelece o *ranking* dos modos de falha observados (estabelecido segundo o número de ocorrências e ordem cronológica caso o número de ocorrências seja o mesmo):

Tabela 15 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 1.*

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Vibração (Rotor)	1
2º	Erosão/ Cavitação (Pás)	1
3º	Fadiga (Pás)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 16 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 41.

Tabela 16 - *Resultados da análise de fiabilidade ao subsistema 1.*

<b>Resultados da análise de fiabilidade no subsistema 1 - Rotor</b>	
Método estatístico de estimativa dos parâmetros de fiabilidade	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 11,3644$ ; $\sigma' = 0,2423$
MTBF (h)	8,88E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	4,96E+04
Tempo de operação máximo (h)	6,32E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem tirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 1 é a lognormal que é característica de componentes que apresentam modos de falha por degradação.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 11,3644 e 0,2423, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 88800 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 1 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 49600 horas e as 63200 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

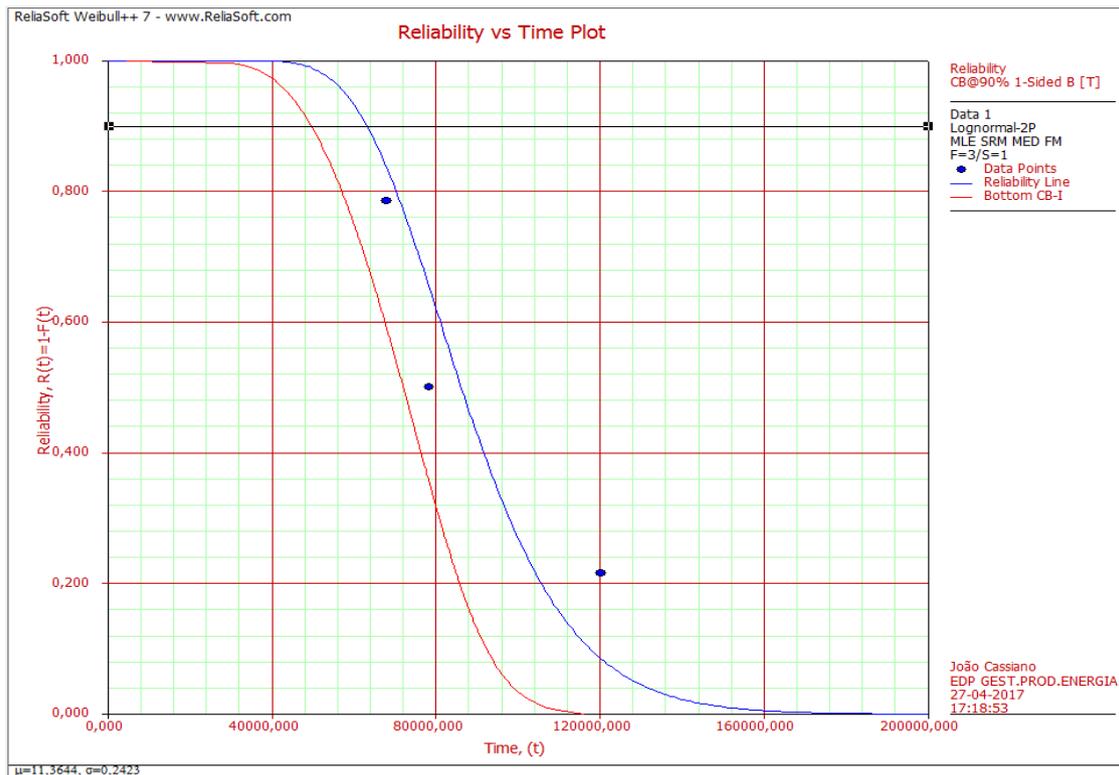


Figura 41 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 1.

#### 4.5.1.2. Resultados da Análise no Subsistema 2 – Junta de Estanqueidade

Composto pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela vedação entre a zona de atuação da água e a parte superior da turbina, este subsistema revela uma grande importância. Caso exista uma falha na estanqueidade da turbina os resultados podem vir a ser catastróficos tanto a níveis económicos como de segurança uma vez que na cota imediatamente superior ao funcionamento da rotor se situa uma zona de passagem de pessoal e onde operam inúmeros equipamentos que não toleram o contato com a água.

A tabela 17 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 17 - Histórico de falhas do subsistema 2.

Histórico de falhas - Junta de estanqueidade					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1969	36489	36489	Anel de desgaste	Desgaste
F	1992	159946	123457	Molas de compressão	Fadiga
F	1995	174735	14789	Anel de desgaste	Desgaste
F	2005	222057	47322	Molas de compressão	Fadiga
S	2016	272494	50437	x	x

Através da análise do histórico deste subsistema é possível verificar uma elevada disponibilidade no mesmo, como seria de esperar. Os modos de falha mais incidentes são o habitual e conveniente desgaste no anel de desgaste e o, também esperado, enfraquecimento das molas de compressão devido à fadiga. A tabela 18 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 18 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 2.*

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Desgaste (anel de desgaste)	2
2º	Fadiga (Molas de compressão)	2

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 19 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 42.

Tabela 19 - *Resultados da análise ao subsistema 2.*

<b>Resultados do subsistema: 2 - Junta de estanqueidade</b>	
Método estatístico de estimativa dos parâmetros de fiabilidade	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 10,8067$ ; $\sigma' = 0,7745$
MTBF (h)	6,66E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	9,98E+03
Tempo de operação máximo (h)	1,83E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem tirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 2 é a lognormal que é característica de componentes que apresentam modos de falha por degradação.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 10,8067 e 0,7745, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 66600 horas de operação.

- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 2 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 9980 horas e as 18300 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.



Figura 42 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 2

#### 4.5.1.3. Resultados da Análise ao Subsistema 3 – Linha de Veios

Responsável pela transmissão da energia mecânica gerada na turbina para o rotor do alternador, o subsistema 3 do sistema “Turbina” é composto por duas posições funcionais: O veio da turbina e o acoplamento entre o veio da turbina e o veio do rotor do alternador. Neste subsistema, aquando de uma operação livre de desequilíbrios, desalinhamentos ou amplitudes excessivas de vibração, é esperada uma total disponibilidade do veio (devido às suas características estruturais) e apenas algumas falhas no acoplamento devidas a processos de degradação.

A tabela 20 apresenta o histórico deste subsistema.

À semelhança dos subsistemas anteriores, é possível verificar uma elevada disponibilidade deste subsistema.

Tabela 20 - Histórico de falhas do subsistema 3.

Histórico de falhas - Linha de veios					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1971	28345	28345	Acoplamento	Desapertos nos pernos
F	1973	68423	40078	Acoplamento	Fadiga
F	1978	138879	70456	Acoplamento	Fadiga
S	2016	272494	133615	x	x

Os modos de falha observados são os esperados desapertos e fadiga no acoplamento, que são bastante agravados, não pela operação normal do grupo, mas sim pelos ciclos de arranque do mesmo e contra os quais a única solução de mitigação seria a redução dos mesmos. A tabela seguinte estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 21 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 3.

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Fadiga (acoplamento)	2
2º	Desapertos (acoplamento)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 22 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 43.

Tabela 22 - Resultados da análise ao subsistema 3.

Subsistema: 3 - Linha de veios	
Método estatístico de estimativa dos parâmetros de fiabilidade	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 11,0540$ ; $\sigma' = 0,7576$
MTBF (h)	8,42E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	1,21E+04
Tempo de operação máximo (h)	2,39E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem tirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 3 é a lognormal que é característica de componentes que apresentam modos de falha por degradação.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 11,0540 e 0,7576, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 84200 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 3 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 12100 horas e as 23900 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

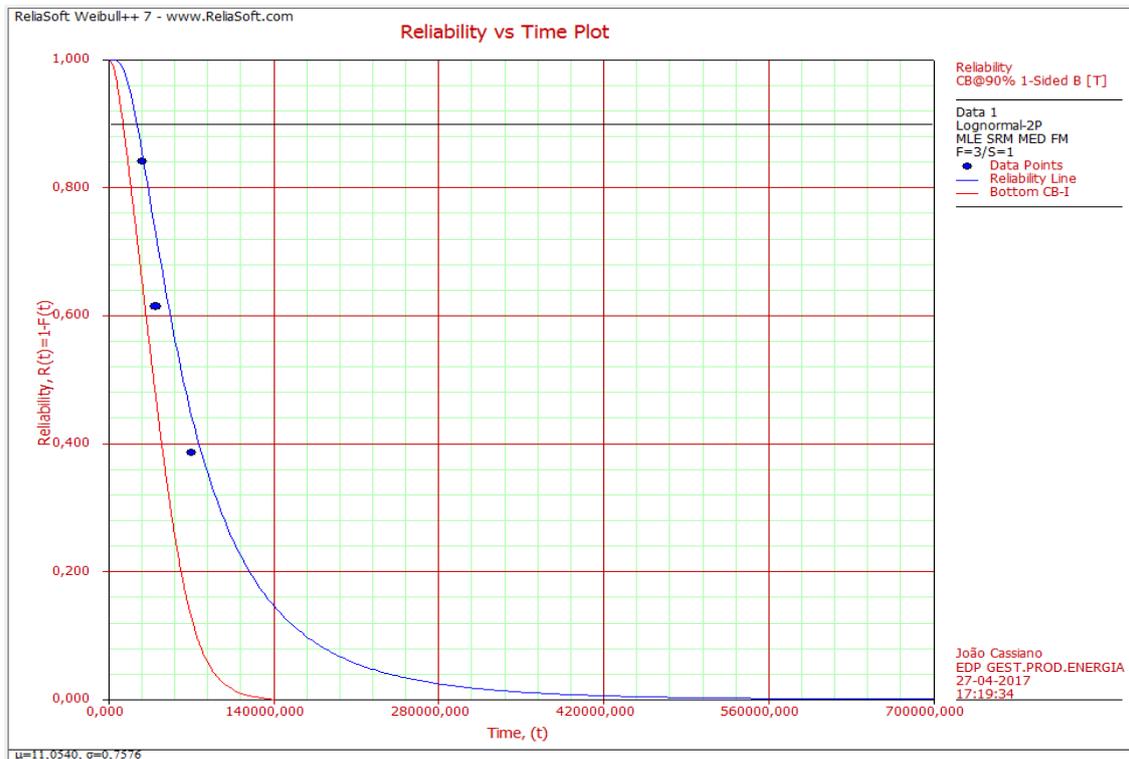


Figura 43 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 3.

#### 4.5.1.4. Resultados da Análise ao Subsistema 4 – Chumaceira Guia

Desempenhando a função de fixação do veio da turbina no sentido radial, este subsistema é composto por uma chumaceira radial de escorregamento cujas posições funcionais são as

partes integrantes desta chumaceira. Este é um dos subsistemas onde é expectável a ocorrência de um maior número de falhas devido às características da sua solicitação.

A tabela 23 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 23 - Histórico de falhas do subsistema 4.

Histórico de falhas - Chumaceira Guia					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1970	42798	42798	Segmentos radiais (3;7)	Desgaste
F	1973	62473	19675	Segmentos radiais (2)	Desgaste
F	1990	150161	87688	Segmentos radiais (4;1;5)	Desgaste
F	1991	154946	4785	Chumaceira Guia	Sobreaquecimento
F	1999	193620	38674	Segmentos radiais (6)	Desgaste
F	2015	263894	70274	Segmentos radiais (3)	Desgaste
S	2016	272494	8600	x	x

Como era expectável, este subsistema apresenta um maior número de falhas do que os subsistemas anteriores. Isto acontece devido à presença de oito segmentos radiais que, em contato com o veio, formam oito pares cinemáticos com movimento relativo de escorregamento e onde se dá um desgaste constante (este desgaste é propositado pois o desgaste nos segmentos evita o desgaste no veio). Então, o modo de falha mais incidente é o esperado e aconselhável desgaste nos segmentos radiais. A tabela 24 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 24 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 4.*

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Desgaste (segmentos radiais)	5
2º	Sobreaquecimento (segmentos radiais)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 25 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 44.

Tabela 25 - Resultados da análise ao subsistema 4.

<b>Subsistema: 4 - Chumaceira Guia</b>	
Método estatístico de estimativa dos parâmetros de fiabilidade	MLE
Distribuição de probabilidades	Weibull 2
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\beta = 1,5059; \eta = 48973,3761$
MTBF (h)	4,42E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	4,92E+03
Tempo de operação máximo (h)	1,10E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem tirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 4 é a *Weibull* bi-paramétrica, podendo esta ser utilizada para descrever qualquer tipo de distribuição de dados quando o início da sua recolha coincide com o início da operação do subsistema.
- A distribuição calculada apresenta valores de vida característica e de parâmetro de forma de 48973,3761 horas e 1,5059, respetivamente. O parâmetro de forma calculado descreve bem o principal modo de falha apurado (Desgaste).
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 44200 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 4 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 4900 horas e as 11000 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

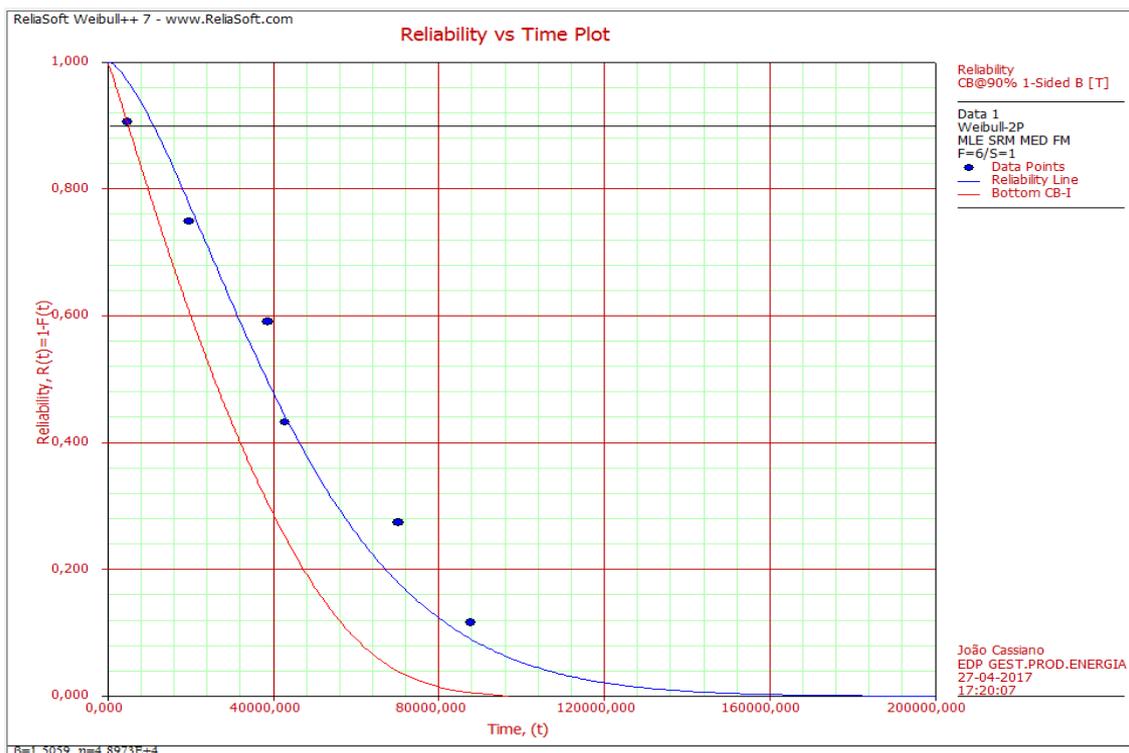


Figura 44 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 4.

#### 4.5.1.5. Resultados da Análise ao Subsistema 5 – Sistema de Refrigeração da Chumaceira Guia

Constituído por duas posições funcionais, este subsistema desempenha a função de refrigeração da chumaceira guia na sua área cinemática. Este, tal como o sistema de refrigeração da chumaceira de impulso, constitui um subsistema independente uma vez que, para realizar uma ação preventiva no mesmo não é necessário intervir com nenhuma das posições funcionais presentes no subsistema 4 – chumaceira guia.

A tabela 26 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 26 - Histórico de falhas do subsistema 5.

Histórico de falhas - Sistema de refrigeração da chumaceira guia					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1989	145892	145892	Permutador	Colmatação
F	1997	183105	37213	Permutador	Colmatação
F	2007	228948	45843	Permutador	Corrosão
S	2016	272494	43546	x	x

Como pode ser observado no histórico anterior, este subsistema tem uma elevada disponibilidade. Sendo o cárter um dos componentes mecânicos existentes com maior fiabilidade, as falhas registadas encontram-se (como seria de esperar) exclusivamente no permutador de refrigeração.

A tabela 27 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 27 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 5.*

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Colmatação (permutador)	2
2º	Corrosão (permutador)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 28 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 45.

Tabela 28- *Resultados da análise ao subsistema 5.*

Subsistema: 5 - Sistema de refrigeração da chumaceira guia	
Método estatístico de estimativa dos parâmetros de fiabilidade	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 11,1231$ ; $\sigma' = 0,5779$
MTBF (h)	8,00E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilaterial inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	1,94E+04
Tempo de operação máximo (h)	3,23E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem retirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 5 é a lognormal que descreve bem os modos de falha verificados.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 11,1231 e 0,5779, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 80000 horas de operação.

- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 5 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 19400 horas e as 32300 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

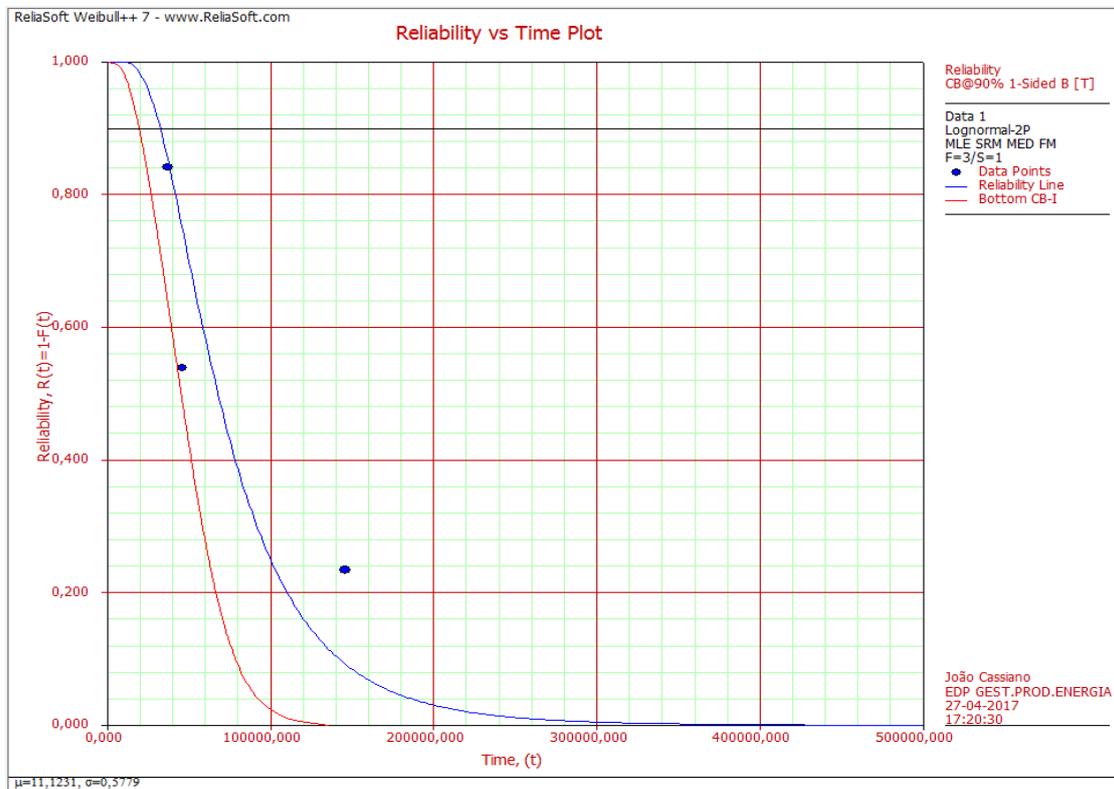


Figura 45 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 5.

#### 4.5.1.6. Resultados da Análise ao Subsistema 6 – Chumaceira de Impulso

Desempenhando a função de suporte do rotor no sentido axial, este subsistema é composto por uma chumaceira axial de rolamento cujas posições funcionais são as partes integrantes da chumaceira. Este é um dos subsistemas onde a partida se espera uma menor disponibilidade, menor ainda que na chumaceira guia, devido à utilização de oito patins axiais de rolamento em vez de segmentos de escorregamento.

A tabela 29 apresenta o histórico deste subsistema.

Tal como no subsistema “Chumaceira guia” o modo de falha mais observado é, como seria de esperar, o desgaste nos pares cinemáticos. Existe também uma intervenção nos absorsores de vibração (molas) após um processo de degradação por fadiga potenciado pelos arranques do grupo. A tabela 30 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 29 - Histórico de falhas do subsistema 6.

Histórico de falhas - Chumaceira de impulso					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1969	39002	39002	Patins axiais (3;4)	Desgaste
F	1981	107361	68359	Patins axiais (4)	Desgaste
F	1984	119796	12435	Patins axiais (4;5;8)	Desgaste
F	1989	148741	28945	Molas	Fadiga
F	2007	227685	78944	Patins axiais (1;3)	Desgaste
F	2007	231252	3567	Patins axiais (2)	Desgaste
F	2016	268821	37569	Patins axiais (5;6)	Desgaste
S	2016	272494	3673	x	x

Tabela 30 - Ranking dos modos de falha registados no subsistema 6.

Pos.	Modo de falha (componente)	nº de falhas
1º	Desgaste (patins axiais)	6
2º	Fadiga (molas)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 31 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 46.

Tabela 31 - Resultados da análise ao subsistema 6.

Subsistema: 6 - Chumaceira de impulso	
Método estatístico	MLE
Distribuição de probabilidades	Weibull 2
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\beta = 1,4284; \eta = 42186,6548$
MTBF (h)	3,83E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	3,93E+03
Tempo de operação máximo (h)	8,73E+03

Através da análise dos resultados obtidos podem retirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 6 é a *Weibull* bi-paramétrica, podendo esta ser utilizada para descrever qualquer tipo de distribuição de dados quando o início da sua recolha coincide com o início da operação do subsistema.

- A distribuição calculada apresenta valores de vida característica e de parâmetro de forma de 42186,6548 horas e 1,4284, respectivamente. O parâmetro de forma calculado descreve bem o principal modo de falha apurado (desgaste).
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 38300 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 6 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 3900 horas e as 8700 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

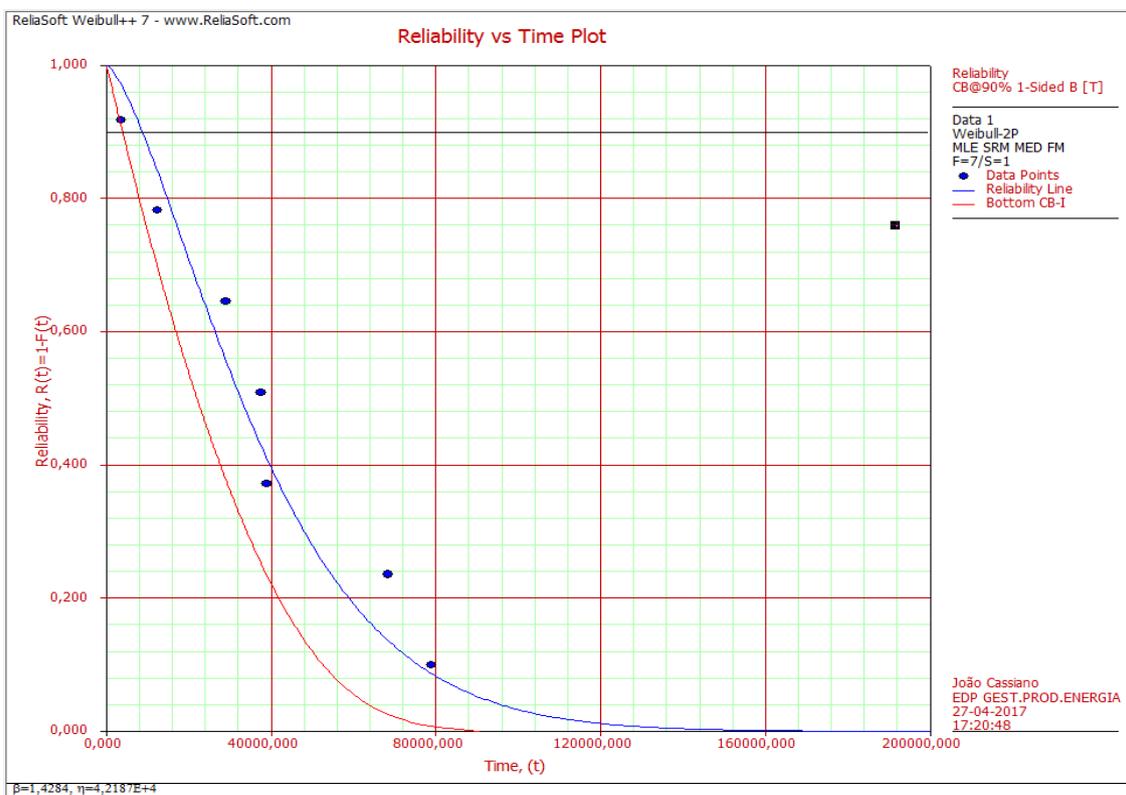


Figura 46 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 6.

#### 4.5.1.7. Resultados da Análise ao Subsistema 7 – Sistema de Refrigeração da Chumaceira de Impulso

Constituído por duas posições funcionais, este subsistema desempenha a função de refrigeração da chumaceira de impulso na sua área cinemática. Este, tal como o sistema de refrigeração da chumaceira de guia, constitui um subsistema independente uma vez que, para

realizar uma ação preventiva no mesmo não é necessário intervir com nenhuma das posições funcionais presentes no subsistema 6 – chumaceira de impulso.

A tabela 32 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 32 - *Histórico de falhas do subsistema 7.*

Histórico de falhas - Sistema de refrigeração da chumaceira de impulso					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1968	32784	32784	Permutador	Colmatção
F	1977	82105	49321	Permutador	Corrosão
F	1984	121186	39081	Permutador	Colmatção
F	2012	252639	131453	Permutador	Colmatção
S	2016	272494	19855	x	x

À semelhança do sistema de refrigeração da chumaceira guia, este subsistema detém uma elevada disponibilidade com casos esporádicos de colmatção e corrosão no permutador. A tabela 33 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 33 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 7.*

Pos.	Modo de falha	nº de falhas
1º	Colmatção (permutador)	3
2º	Corrosão (permutador)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 34 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 47.

Tabela 34 - *Resultados da análise ao subsistema 7.*

Subsistema: 7 - Sistema de refrigeração da chumaceira de impulso	
Método estatístico	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 10,8998$ ; $\sigma' = 0,5286$
MTBF (h)	6,23E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	1,78E+04
Tempo de operação máximo (h)	2,75E+04

Através da análise dos resultados obtidos podem retirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 7 é a lognormal que descreve bem os modos de falha verificados.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 10,8998 e 0,5286, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 62300 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 7 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 17800 horas e as 27500 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.



Figura 47 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 7.

#### 4.5.1.8. Resultados da Análise ao Subsistema 8 – Distribuidor

Desempenhando a função de válvula de admissão e regulação de caudal de água que aflui ao rotor da turbina, este subsistema é bastante solicitado (tanto quanto a soma do número de arranques do grupo com os ajustes na produção em plena operação) e sujeita a condições extremas de pressão, corrosão e erosão. Como tal este é um subsistema no qual é expectável menor disponibilidade do que nos outros.

A tabela 35 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 35 - *Histórico de falhas do subsistema 8.*

Histórico de falhas - Distribuidor					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1967	28142	28142	Chumaceira inferior (2)	Desgaste casquilho
F	1969	35451	7309	Chumaceira inferior (18)	Desgaste casquilho
F	1970	43222	7771	Chumaceira superior (11)	Desgaste casquilho
F	1973	58616	15394	Chumaceiras inferiores (4; 17)	Desgaste casquilho
F	1980	100699	42083	Chumaceira superior (18)	Desgaste casquilho
F	2003	212697	111998	Guiam. do anel de comando	Corrosão
F	2007	228003	15306	Chumaceira inferior (5)	Desgaste Casquilho
S	2016	272494	44491	x	x

Após a análise do histórico deste subsistema pode concluir-se que as suas posições funcionais mais críticas são as chumaceiras de suporte das pás diretrizes, sendo o modo de falha mais incidente o desgaste nos casquilhos. Isto decorre devido não só ao elevado número de arranques do grupo, mas também à elevada tensão a que estes casquilhos estão sujeitos durante o movimento relativo de escorregamento que faz com que acelere bastante o processo de desgaste.

A tabela 36 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 36 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 8.*

Pos.	Modo de falha	nº de falhas
1º	Desgaste (chumaceiras inferiores)	4
2º	Desgaste (chumaceiras superiores)	2
3º	Corrosão (Guiamento do anel de comando)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 37 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 48.

Através da análise dos resultados obtidos podem retirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 8 é a lognormal que descreve bem os modos de falha verificados.
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão dos logaritmos naturais dos valores TTF e TTS de 10,1186 e 0,9678, respetivamente.

- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 39600 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 8 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha aproximadamente entre as 3900 horas e as 7200 horas, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

Tabela 37 - Resultados da análise ao subsistema 8.

Subsistema: 8 - Distribuidor	
Método estatístico	MLE
Distribuição de probabilidades	lognormal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu' = 10,1186; \sigma' = 0,9678$
MTBF (h)	3,96E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	3,94E+03
Tempo de operação máximo (h)	7,17E+03

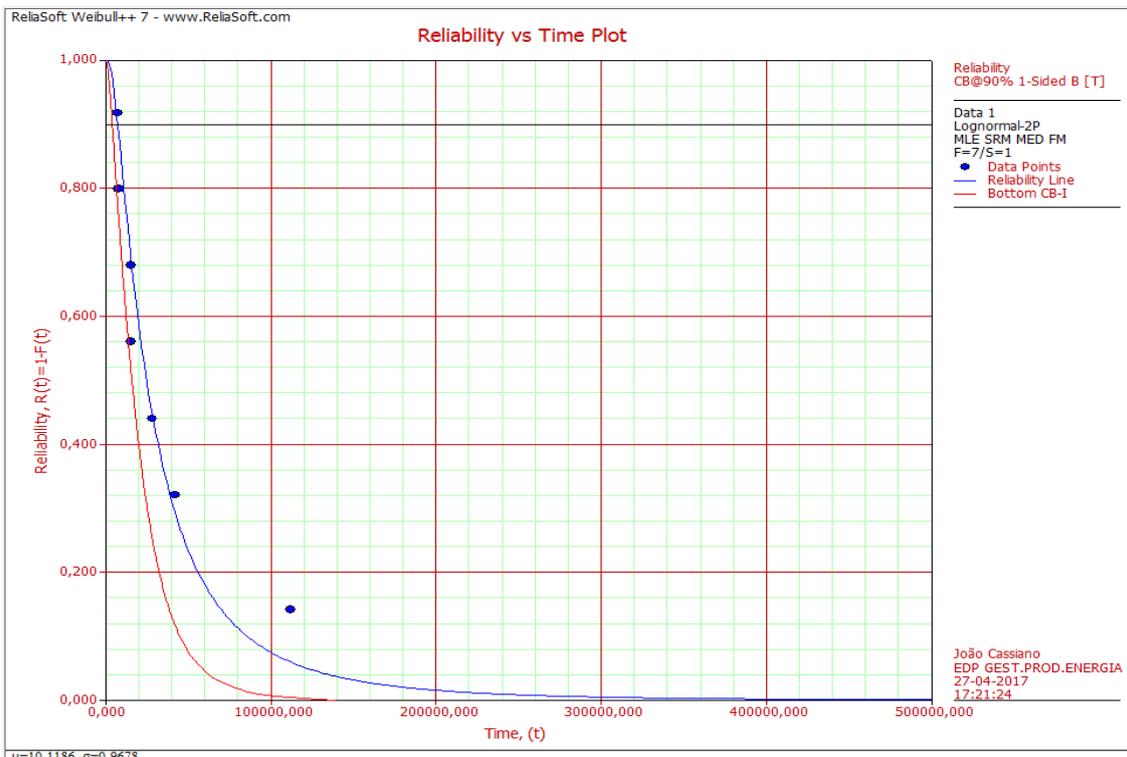


Figura 48 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 8

#### 4.5.1.9. Resultados da Análise ao Subsistema 9 – Sistema de Acionamento do Distribuidor.

Composto pelo conjunto de posições funcionais responsáveis pela movimentação das pás diretrizes do distribuidor, este subsistema é geralmente detentor de uma elevada disponibilidade devido às características mecânicas das mesmas. Este subsistema está situado fora da zona de contato com a água, imediatamente na cota acima do distribuidor, o que faz com que as intervenções preventivas no mesmo possam ser independentes das do subsistema 8 – distribuidor.

A tabela 38 apresenta o histórico deste subsistema.

Tabela 38 - *Histórico de falhas do subsistema 9.*

Histórico de falhas - Sistema de acionamento do distribuidor					
Estado	Ano	Horas acumuladas	TTF's e TTS	Componente	Modo de falha
F	1963	15564	15564	Biela (3)	Desgaste
F	1982	113995	98431	Biela (8)	Desgaste
F	2004	215640	101645	manivela (17)	Desgaste
S	2016	272494	56854	x	x

Como se pode observar no histórico de falhas deste subsistema, existiram apenas esporádicas intervenções em algumas bielas e manivelas devido a um processo de desgaste ocorrido na área de contato cinemático entre os mesmos. A tabela 39 estabelece um *ranking* dos modos de falha observados neste subsistema.

Tabela 39 - *Ranking dos modos de falha registados no subsistema 9.*

Pos.	Modo de falha	nº de falhas
1º	Desgaste (bielas)	2
2º	Desgaste (manivelas)	1

Após a inserção dos dados TTF e TTS no *software Weibull ++7* e posterior realização de todo o processo de análise de fiabilidade dos subsistemas, descrito anteriormente, foi possível obter os resultados pretendidos estando estes representados na tabela 40 bem como o gráfico da fiabilidade em função do tempo de operação em horas, na figura 49.

Tabela 40 - Resultados da análise ao subsistema 9.

Subsistema: 9 - Sistema de acionamento do distribuidor	
Método estatístico	MLE
Distribuição de probabilidades	Normal
Valor dos parâmetros de fiabilidade	$\mu = 78112,8297$ ; $\sigma = 38649,8778$
MTBF (h)	7,81E+04
Fiabilidade mínima requerida (%)	90
Intervalo de confiança unilateral inferior (%)	90
Tempo de operação mínimo (h)	0,00E+00
Tempo de operação máximo (h)	2,86E+04

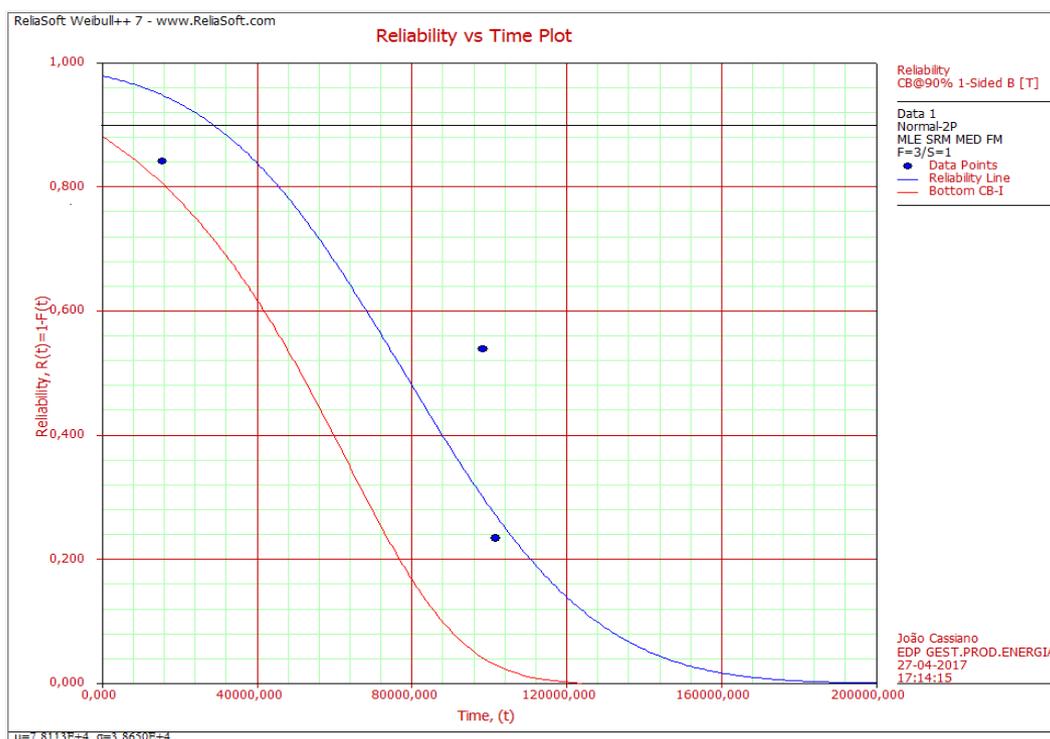


Figura 49 - Gráfico Fiabilidade vs tempo de operação do subsistema 9

Através da análise dos resultados obtidos podem retirar-se os seguintes apontamentos e conclusões:

- A distribuição que melhor descreve os dados de vida útil referentes ao subsistema 9 é a Normal
- A distribuição calculada apresenta valores de média e desvio padrão de 78112,8297 horas e 38649,8778 horas, respetivamente.
- Este subsistema apresenta um tempo médio entre falhas correspondente a aproximadamente 78113 horas de operação.
- Conservando um intervalo de confiança unilateral inferior de 90% pode afirmar-se que o subsistema 9 sofre um acréscimo de 10% de probabilidade de falha

aproximadamente nas primeiras 7170 horas de funcionamento, intervalo no qual se deve agendar uma intervenção preventiva segundo os requisitos do segmento hierárquico onde se encontra a Central EDP.

#### **4.5.1.10. Análise aos Modos de Falha**

Paralela à análise de fiabilidade aos subsistemas, demonstrada anteriormente, e após um levantamento de todos os modos de falha registados no sistema “Turbina” desde a ativação do grupo 2 da Central Hidroelétrica EDP, foi realizada uma análise de Pareto aos mesmos podendo ser consultado o respectivo diagrama no Anexo D.

Através da análise do diagrama de Pareto obtido, pode concluir-se que:

1. Cerca de 56% das falhas registadas neste sistema devem-se a um modo de falha por desgaste, ocorrido nos pares cinemáticos presentes nas chumaceiras, junta de estanqueidade e sistema de acionamento do distribuidor. Este tipo de modo de falha não alerta para qualquer tipo de defeito na operação ou projeto da turbina uma vez que é usual e aconselhável o desgaste destes componentes que, ao constituírem um par cinemático com veios de transmissão ou outros componentes de maior importância (económica ou para o funcionamento da turbina), são projetados para serem menos rígidos que estes, protegendo-os através do seu próprio desgaste. O controlo e medição do desgaste nas diversas paragens programadas para intervenções preventivas deve ser efetuado.
2. Aproximadamente 16% das falhas registadas tiveram origem num processo de fadiga. A falha por fadiga ocorre devido à nucleação e propagação de defeitos em materiais devido a ciclos alternados de tensão/deformação. No caso da Turbina em estudo, a amplitude de tensão alternada a que esta é submetida em regime de operação contínua é relativamente baixa. Quando se registam os maiores valores de pico de amplitude de tensão alternada é precisamente nas fases de arranque sendo estas os maiores agentes potenciadores das falhas por fadiga neste sistema. Quanto à mitigação deste modo de falha, a única alternativa será, tanto quanto possível, diminuir o número de arranques do grupo. Ensaios não destrutivos de controlo de propagação de fissuras nas superfícies das posições funcionais sujeitas a este modo de falha devem ser efetuados aquando das paragens programadas para intervenção preventiva.
3. Cerca de 13% das falhas registadas devem-se a mecanismos de colmatação presentes nos permutadores de refrigeração do óleo das chumaceiras (subsistemas 5 e 7). Ações de limpeza e desobstrução dos filtros dos permutadores devem ser efetuadas aquando das paragens programadas para intervenção preventiva.

4. Aproximadamente 9% das falhas registadas tiveram origem em modos de falha por corrosão, presentes nos permutadores de refrigeração do óleo das chumaceiras (subsistemas 5 e 7) e no guiamento do anel de comando do distribuidor (subsistema 8). Este acontecimento é devido às condições extremas de humidade presentes na “caverna” escavada no solo, onde se situam os grupos geradores. Com vista à mitigação deste modo de falha devem ser efetuadas, tanto quanto possível, proteções catódicas nas superfícies das posições funcionais onde o mesmo foi registado. O controlo da corrosão deve ser efetuado nas paragens programadas para intervenções preventivas.
5. Cerca de 3% das falhas registadas correspondem à deteção de amplitudes excessivas de vibração no subsistema 1 - Rotor. Este acontecimento pode ter sido devido a diversos fatores que, por não terem sido registados no histórico, não é possível discernir qual o que esteve na origem desta falha. Desaperto no cone de aperto ou operação indevida do distribuidor são exemplo de fatores que podem estar na origem deste acontecimento.
6. Aproximadamente 3% das falhas registadas correspondem a um processo de erosão por cavitação nas pás da rotor da turbina. Este é um modo de falha que leva à perda de massa (espessura) nas pás da rotor das turbinas e está sempre presente neste tipo de exploração. Esta perda de espessura, para além de fragilizar o rotor tornando-o mais susceptível a roturas, afeta o rendimento da turbina. Então, define-se um valor percentual limite de perda de massa, a partir do qual se deve intervir na rotor para efetuar enchimentos através de soldadura. Esta perda de massa deve ser controlada aquando das paragens programadas para intervenção preventiva.
7. Cerca de 3% das falhas registadas correspondem a desapertos no acoplamento. Este acontecimento deveu-se a uma falha de projeto no acoplamento da linha de veios, especificamente, nos pernos de aperto. Após esta falha os pernos foram substituídos por outros mais adequados e nunca mais se registaram falhas deste tipo.
8. Aproximadamente 3% das falhas registadas têm origem no sobreaquecimento dos segmentos radiais da chumaceira guia. Este acontecimento ocorreu na sequência de uma descolagem de um dos segmentos radiais, que provocou uma fuga de óleo.

*Nota: A soma de todas as percentagens referentes aos modos de falha mencionados anteriormente é igual a 106%. Isto porque foram utilizados os valores aproximados das mesmas e não os valores exatos.*

## 4.6. Programação das Intervenções Preventivas

Após a obtenção e análise de resultados referentes à análise de fiabilidade e ocorrência de modos de falha em todos os subsistemas, reúnem-se todas as condições para a elaboração do plano de manutenção do sistema “Turbina”. Esta etapa será composta, numa primeira fase, pela definição de diversos blocos de paragens programadas para intervenções preventivas, onde a sua periodicidade será definida pela otimização da interseção entre os intervalos calculados através da análise de fiabilidade de cada subsistema. Numa segunda fase serão definidas todas as ações preventivas a efetuar em cada um dos blocos, tendo como base o plano já existente na central e a análise de modos de falha efetuada anteriormente.

### 4.6.1. Definição de Blocos de Intervenções Preventivas

A figura 50 demonstra, para cada um dos subsistemas em estudo, os intervalos de operação em horas nos quais não se deve efetuar qualquer ação preventiva nos mesmos (a verde) e os intervalos nos quais se pode agendar uma intervenção preventiva (a vermelho).

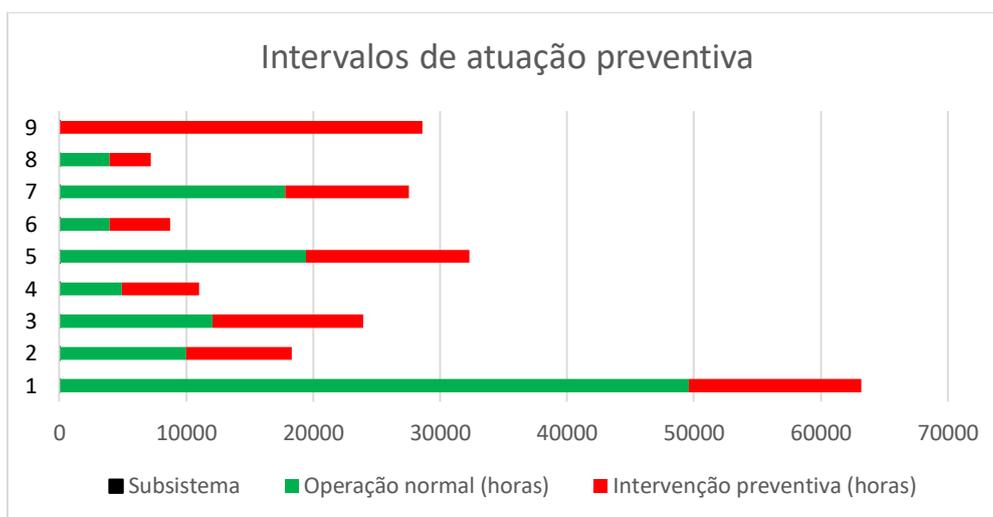


Figura 50 - Intervalos de atuação preventiva nos subsistemas.

Realizando a interseção entre os intervalos nos quais se pode efetuar uma paragem programada para intervenção preventiva, efetuada do ponto de vista da maximização do tempo de operação (e conseqüente minimização do número de intervenções) em cada subsistema, obtêm-se os blocos de manutenção preventiva representados na tabela 41.

**Estes blocos de intervenções preventivas referem-se apenas às “grandes intervenções”, que requerem a consignação do grupo gerador para a sua efetuação. Adicionalmente devem ser efetuadas rondas semanais de verificação dos manómetros dos diversos instrumentos de medição e controlo (pressostatos, termostatos, caudalímetros, indicadores de nível de óleo), inspeção visual exterior e auscultação de ruídos.**

Tabela 41 - Definição de blocos de intervenções preventivas.

	<b>Bloco A</b>	<b>Bloco B</b>	<b>Bloco C</b>	<b>Bloco D</b>
<b>Subsistemas</b>	4; 6; 8	2; 3	5; 7; 9	1
<b>Periodicidade</b>	7200 h	18300 h	27500 h	63200 h

#### 4.6.2. Definição das Ações de Inspeção/Manutenção Preventiva

A definição das ações de manutenção, efetuadas aquando dos diversos blocos de intervenções preventivas será apresentada de seguida e tem como base o plano já existente na central em estudo juntamente com a análise de pareto aos modos de falha registados.

##### 4.5.2.1. Bloco A

###### Subsistema 4 – Chumaceira Guia:

- Verificação do nível de óleo e, se necessário, atestar.
- Verificação da existência de fugas de óleo.
- Verificação da temperatura do óleo.
- Auscultação de ruídos.
- Verificação do desgaste nos segmentos e, se necessário, substituir.
- Verificação do estado geral da pintura.
- Limpeza exterior da cuba.
- Verificação do aperto dos parafusos da cuba.
- Controlo da folga entre a tampa da chumaceira guia e o veio.
- Verificação do funcionamento da sonda de temperatura.
- Verificação do funcionamento do detetor de nível de óleo.
- Verificação do funcionamento do termómetro.

### **Subsistema 6 – Chumaceira de impulso:**

- Auscultação de ruídos.
- Verificação do estado geral da pintura.
- Controlo da folga nos patins.
- Verificação do desgaste nos patins.
- Limpeza exterior da cuba.
- Verificação do aperto dos parafusos da cuba.
- Verificação do funcionamento das sondas de temperatura.
- Verificação do funcionamento da sonda de temperatura.
- Verificação do funcionamento do detetor de nível de óleo.
- Verificação do funcionamento do termómetro.

### **Subsistema 8 – Distribuidor:**

- Lubrificação do anel de comando.
- Verificação de fugas de água na tampa superior da turbina.
- Verificação da estanqueidade nas chumaceiras superiores das pás diretrizes.
- Limpeza do distribuidor, incluindo a face interior da tampa da turbina.
- Verificação do estado geral da pintura interior da tampa da turbina.
- Limpeza do guiamento do anel de comando.
- Controlo da corrosão no guiamento do anel de comando.
- Lubrificação do guiamento do anel de comando.
- Controlo das folgas entre as pás diretrizes e as chumaceiras superiores e inferiores.
- Verificação da erosão das pás diretrizes.
- Verificação do desgaste nos casquilhos das chumaceiras inferiores e superiores.

- Verificação o estado da pintura das pás diretrizes.
- Verificação do estado da pintura exterior anticorrosiva da tampa da turbina.

#### **4.5.2.3. Bloco B**

##### **Subsistema 2 – Junta de estanqueidade:**

- Limpeza geral da junta.
- Verificação do desgaste no anel de desgaste, e se necessário, substituição.
- Verificação do desgaste no anel porta juntas, e se necessário, substituição.
- Controlo da corrosão na superfície da coroa de guiamento.
- Controlo de eventuais desapertos na coroa de guiamento.
- Controlo da rigidez das molas de compressão e, se necessário, substituir.
- Verificação do funcionamento do servomotor de vedação.
- Verificação de fugas de óleo nos servomotores de vedação.
- Limpeza exterior do servomotor de vedação.
- Verificação estado geral da pintura.
- Verificação de fugas no circuito de alimentação de água.

##### **Subsistema 3 – Linha de veios:**

- Limpeza exterior do acoplamento.
- Verificação do aperto dos pernos de aperto.
- Controlo da corrosão na superfície do acoplamento.
- Ensaio de líquidos penetrantes na superfície do acoplamento.
- Inspeção visual ao veio.

#### **4.5.2.3. Bloco C**

##### **Subsistema 5 – Sistema de refrigeração da chumaceira guia:**

- Limpeza exterior do cárter.
- Limpeza completa do permutador.
- Verificação de fenómenos de corrosão no permutador.
- Verificação de fugas de óleo.
- Desmontagem e limpeza caudalímetro da água de refrigeração.
- Verificação de fugas de água na tubagem da refrigeração.
- Verificação do estado da tubagem da água da refrigeração.
- Verificação do nível de óleo e, se necessário, atestar.
- Verificação da existência de fugas de óleo.

##### **Subsistema 7 – Sistema de refrigeração da chumaceira de impulso.**

- Limpeza exterior do cárter.
- Limpeza completa do permutador.
- Verificação de fenómenos de corrosão no permutador.
- Verificação de fugas de óleo.
- Desmontagem e limpeza caudalímetro da água de refrigeração.
- Verificação de fugas de água na tubagem da refrigeração.
- Verificação do estado da tubagem da água da refrigeração.
- Verificação do nível de óleo e, se necessário, atestar.
- Verificação da existência de fugas de óleo.

#### **Subsistema 9 – Sistema de acionamento do distribuidor:**

- Verificação de fugas de óleo nos servomotores e tubagem.
- Limpeza exterior dos servomotores
- Inspeção visual do estado da superfície das bielas e manivelas.
- Controlo do tempo de abertura e fecho.
- Verificação do estado dos fins de curso de posição de abertura do distribuidor.

#### **4.5.2.4. Bloco D**

##### **Subsistema 1 – “Rotor”:**

- Verificação do desgaste, cavitações e eventuais fissuras nas pás do rotor e, se necessário, reparação (inspeção visual e ensaio de líquidos penetrantes).
- Verificação do estado da proteção anticorrosiva.
- Verificação do estado e aperto dos parafusos de fixação do cone de aperto.
- Controlo das folgas radiais entre o rotor e forra de desgaste.

# Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

## 5.1. Conclusões

O trabalho desenvolvido teve, numa primeira abordagem, a finalidade dar a conhecer a realidade com que, hoje em dia, a área da manutenção industrial se depara dentro de uma grande empresa de produção de energia elétrica. Crescentes restrições e exigências derivadas de questões ambientais e segurança, agravadas por um aumento significativo do número de empresas concorrentes no mercado, tornam imperativa a revisão e adequação das estratégias de gestão de recursos das empresas.

Ao longo do tempo a mentalidade na abordagem à manutenção evoluiu de forma acentuada, deixando esta de constituir “um mal necessário”, mas sim uma oportunidade para as empresas se diferenciarem da concorrência e se tornarem mais competitivas. Uma filosofia de atuação após a falha, que significa grandes períodos de indisponibilidade e custos elevados de reparação dos equipamentos, foi substituída por uma filosofia de atuação antes da falha que se revela muito mais eficaz na maximização da disponibilidade e minimização de custos de reparação. Hoje em dia já não basta que a gestão da manutenção seja eficaz, tendo esta tem também que ser eficiente e direcionada para a maximização do retorno.

Uma das formas mais eficientes de gerir o ciclo de vida dos ativos físicos é através de metodologias assentes na previsão das suas falhas, como é o caso da análise de fiabilidade. O aprofundamento de conhecimentos nesta área e aplicação prática dos mesmos era outra das finalidades deste Trabalho Final de Mestrado.

Através do estudo do comportamento em vida dos ativos físicos torna-se possível discernir uma aproximação do seu comportamento futuro. A análise de fiabilidade resulta na quantificação da probabilidade de falha dos ativos ao longo do tempo de operação, permitindo à gestão da manutenção o desenvolvimento de uma estratégia otimizada, onde o objetivo se situa onde se atinge o equilíbrio entre a disponibilidade e os custos de manutenção preventiva.

O estudo prático desenvolvido permitiu, numa primeira abordagem, conhecer os componentes principais de uma central hidroelétrica bem como o seu processo de geração. Uma turbina hidráulica *Francis* de eixo vertical foi inteiramente analisada e descrita quanto ao seu princípio de funcionamento e componentes mecânicos que a constituem.

Uma visão vanguardista, implementada anteriormente à realização deste estudo, quanto à organização funcional dos ativos físicos em meio industrial, demonstrou-se extremamente interessante uma vez que, através da lógica da subdivisão em sistemas, subsistemas e posições funcionais tornou possível direcionar a análise de fiabilidade e as ações de

manutenção para grupos de função, otimizando todo o processo. De outra forma a análise teria de incidir em toda a turbina, o que iria originar uma periodicidade da manutenção determinada pelo componente com fiabilidade mais baixa (uma vez que, por ser direcionada apenas a posições funcionais críticas, constitui um sistema em série) resultando na manutenção por excesso dos componentes com fiabilidade mais alta.

Uma análise de fiabilidade a cada um dos nove subsistemas que constituem o sistema abordado foi realizada permitindo confirmar a existência de uma grande discrepância entre alguns destes, quanto ao seu comportamento fiabilístico. Por exemplo, a diferença do valor em horas de operação ao qual se atinge a queda de fiabilidade máxima requerida pela DOM (10%) entre o subsistema 1 (Rotor) e o subsistema 6 (Chumaceira de impulso) é de aproximadamente 54470 horas de operação, o que demonstra que seria um grande erro o gasto de recursos na realização de intervenções preventivas no primeiro com a mesma periodicidade que o segundo.

Uma análise aos modos de falha verificados neste sistema permitiu concluir que a maioria das falhas registadas foi originada por mecanismos de falha por deriva, nomeadamente o desgaste em pares cinemáticos e a fadiga originada pela grande amplitude de tensão alternada atingida nos ciclos de arranque do grupo.

A aplicação de intervalos de confiança unilaterais inferiores de 90% permitiu, não só lidar da melhor forma com a incerteza criada pelo reduzido número de dados de falha dispostos para a realização da análise de fiabilidade aos subsistemas, tornando este método mais conservativo e menos falível, mas também obter intervalos de tempo como resultado dessa análise o que permitiu a otimização do número de blocos de intervenção preventiva de nove para quatro, criados através da interceção entre os vários intervalos.

Numa última abordagem e completando assim o plano de manutenção do sistema “Turbina” do grupo 2 da Central Hidroelétrica EDP, foram definidas as ações de inspeção e manutenção preventivas a realizar aquando da paragem programada de cada um dos subsistemas, com base no plano já existente e na análise de Pareto aos modos de falha realizada.

A grande dificuldade encontrada no RCM prende-se no facto de que seria necessário deixar que as falhas ocorressem para que os seus dados gerassem uma análise de fiabilidade aos subsistemas fidedigna. Uma vez que não é possível reproduzir esta realidade em meio industrial, pois representa grandes contrapartidas ao nível da produção, segurança, ambiente e custos de reparação, as falhas presentes no histórico de falhas são, para além de algumas de natureza funcional, as que têm sido identificadas como falhas potenciais aquando das paragens para manutenção preventiva sistemática. Assim, os resultados deste tipo de estudo devem ser sempre validados por pessoal competente, inserido na realidade operacional do sistema em questão, e constar apenas um modelo de apoio à tomada de decisão.

Por motivos de confidencialidade estratégica da empresa não foi possível revelar o plano de manutenção e seus valores associados, presentemente em vigor no sistema abordado pelo

que, este estudo carece de uma análise comparativa entre o plano proposto e o que decorre no presente. Apenas referir que este se trata de um método homogéneo e aplicável a qualquer central de produção de energia e que a sua aplicação evita a discrepância entre as abordagens de manutenção que hoje existem no universo de centrais do Grupo EDP, permitindo à DOM um maior controlo sobre a gestão e otimização de recursos de manutenção.

## 5.2. Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de um modelo de análise de degradação com vista à obtenção dos parâmetros de fiabilidade do subsistema 1 do sistema “Turbina” pertencente ao grupo gerador estudado neste TFM, através de ensaios periódicos de quantificação do desenvolvimento de microfissuras na estrutura metálica que constitui o rotor, resultantes de um processo de fadiga verificado e identificado como uma consequência dos picos de tensão alternada provocados pelos ciclos de arranque do grupo gerador. Através da definição de um comprimento de fenda máximo admissível conservativo, mediante a aplicação dos conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica, e do cálculo da velocidade de propagação de fenda torna-se possível definir uma periodicidade de intervenções com vista à prevenção deste modo de falha no referido subsistema.
- Extrapolação da metodologia de análise de fiabilidade, desenvolvida neste Trabalho Final de Mestrado apenas para um dos diversos sistemas constituintes de uma central hidroelétrica do Grupo EDP, para a totalidade dos sistemas da mesma. Futuramente, uma vez conhecido o comportamento fiabilístico de todos os subsistemas, o objetivo centrar-se-á na implementação da Manutenção Baseada no Risco (RBM), sendo o valor do Risco dado pela multiplicação entre a probabilidade de falha do subsistema ao longo de uma dada missão e a consequência de falha desse subsistema. A consequência de falha de um subsistema é fixa ao longo do tempo e é dada pela soma dos custos diretos e indiretos associados a uma paragem não-programada do mesmo.



# Referências

Amendola, L. (2014), “Herramientas para la Auditoría y Certificación en Gestión de Activos - PAS 55 e ISO 55001” presented in 2nd international conference of Maintenance, Canal do Panamá, 2014.

Assis, R. (2010), “Apoio a Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos”, Lisboa: Lidel –Edições Técnicas, Lda, ISBN: 978-972-757-605-0.

British Standards Institution. (2008), “Asset management: PAS 55-1, Part 1”. ISBN: 978-0-580-50975-9.

Cabral, J. S., (2004), “Organização e Gestão da Manutenção”, Lisboa: LIDEL – Edições Técnicas Lda, ISBN: 978-972-757-440-7.

Carinhas, H.P. (2009), “Manual de Fiabilidade”, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

Davies, R., Dieter, J. and McGrail, T. (2011), "The IEEE and asset management: A discussion paper", presented at Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 24-29 July 2011.

Demir, G. and Yildiz, A. (2016), “Importance of Reliability for Power Electronic Circuits, Case Study: Inrush Current Test and Calculating of Fuse Melting Point”, presented at IEEE – PEMC conference, 25 – 30 September 2016, Varna, Bulgaria.

Dhillon, B. (1999), “Engineering Maintainability”, Ottawa: Elsevier Science & Technology books, ISBN: 978-0-88415-257-6.

Farinha, J. M. T., (1997), “Manutenção das Instalações e Equipamentos Hospitalares”, Coimbra: Livraria Minerva Editora, ISBN: 972-8318-16-2.

Hastings, N. A. J. (2010), “Physical asset management”, Springer-Verlag London Limited, ISBN: 978-1-84882-751-6.

[http:// www.weibull.com](http://www.weibull.com) [accessed 07/02/2016].

Hugget, J. (2005), “Asset Management – the changing role of Maintenance Management” presented in IMC conference – May, 2005.

IBM. (2007), “The evolution of Asset Management - Finding the Right Best Practice is Not All Theory”, United States of America.

Instituto Português da Qualidade (ISQ). (2007), "Terminologia da Manutenção: Norma portuguesa NP EN 13306", Portugal.

ISO, (2014), "ISO 55000 - Asset management — Overview, principles and terminology", Switzerland.

Johannsson, C. (2013), "On system safety and reliability methods in early design phases" Master Thesis, Linköping University, Sweden.

Márquez, A. C. et al. (2009), "The Maintenance Management Framework: a Practical View to Maintenance Management". Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 15, n. 2, pp. 167-178.

Marvin, R. and Arnljot, H. (2004), "System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications". Second Edition, ed. New Jersey and Canada: John Wiley&Sons, Inc. Hoboken, ISBN: 978-0-471-47133-2.

Mitchell, J.S., eds. (2002), "Physical asset management handbook." 3rd edition Houston, Texas: Clarion, ISBN: 978-098-536-193-8.

Monchy, F. (1989), "A Função Manutenção - Formação para a Gerência da Manutenção Industrial." São Paulo: Editora Durban Ltda, ISBN: 978-848-702-211-1.

Moss, T.R. (2005), "The Reliability Data Handbook", London and Bury St Edmunds, UK: Professional Engineering Publishing Limited, ISBN: 978-1-86058-444-2.

OSHA. (2002), "Job Hazard Analysis", U.S. Department of Labor, United States of America.

Palombo, C. (2005), "Eight steps to optimize your strategic assets," Power and Energy Magazine, IEEE, vol.3, no.3, pp. 46- 54, May-June 2005.

Pinto, V. M., (1994), "Gestão da Manutenção", Lisboa: Edições IAPMEI, ISBN: 972-920-557-4.

ReliaSoft Corporation (2007), Weibull ++7, Version 7.5.1.

Reliasoft Corporation. (2015), "Weibull ++7: Life Data Analysis Reference", Tucson: Reliasoft Publishing.

Shahidehpour, M. and Ferrero, R. (2005), "Time management for assets: chronological strategies for power system asset management" Power and Energy Magazine, IEEE, vol.3, no.3, pp. 32- 38, May-June 2005.

U.S. Department of energy. (2010), "Operations & Maintenance Best Practices - A Guide to Achieving Operational Efficiency" release 3.0, United States of America.

Wagner, J. C. (2014), "Gestión de Activos". presented in 2nd international conference of Maintenance, Canal do Panamá, 2014.

Wyrebski, Jerzy. (1997), "Manutenção Produtiva Total – Um Modelo Adaptado". Master thesis. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Zaions, D. R. (2003), "Manutenção Industrial com Enfoque na Manutenção Centrada em Confiabilidade". Master thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.



# **Anexos**

# **Anexo A**

<b>Ano</b>	<b>Horas de Funcionamento</b>	<b>Horas de Funcionamento Acumuladas</b>
1961	4528	4528
1962	4226	8754
1963	3941	12695
1964	5045	17740
1965	3765	21505
1966	3910	25415
1967	3725	29140
1968	4310	33450
1969	6660	40110
1970	5112	45222
1971	5737	50959
1972	6654	57613
1973	6543	64156
1974	6211	70367
1975	5465	75832
1976	4198	80030
1977	6689	86719
1978	6517	93236
1979	7452	100688
1980	5239	105927
1981	4248	110175
1982	4622	114797
1983	4919	119716
1984	4919	124635
1985	5930	130565
1986	4875	135440
1987	4778	140217
1988	4778	144995
1989	4778	149773
1990	4778	154551
1991	4778	159329
1992	4778	164106
1993	4778	168884
1994	4778	173662
1995	4071	177733
1996	4532	182265
1997	4857	187122
1998	5371	192493

<b>Ano</b>	<b>Horas de Funcionamento</b>	<b>Horas de Funcionamento Acumuladas</b>
1999	4233	196726
2000	5102	201828
2001	4624	206452
2002	2563	209015
2003	5983	214998
2004	5195	220193
2005	3415	223608
2006	3977	227585
2007	5154	232739
2008	3737	236476
2009	4133	240609
2010	6164	246773
2011	3580	250353
2012	2562	252915
2013	4487	257402
2014	5627	263029
2015	3915	266944
2016	5550	272494

<b>Média horas/ano</b>	4954,473
<b>Média horas/mês</b>	412,8727

# **Anexo B**

Subsist.	Posição funcional	Questões de avaliação da criticidade										Crítico ou N/Crítico?				
		Produção					Seg/Amb		C/Manut.							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11			
1	Coroa	N	N	S												Crítico
	20 Pás	N	N	S												Crítico
	Banda	N	N	S												Crítico
	Cone de aperto	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
2	Anel de desgaste	S														Crítico
	Anel porta juntas	S														Crítico
	Coroa de guiamento	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Molas de compressão da vedação da junta axial	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Servomotor de vedação da junta axial	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
3	Veio	S														Crítico
	Acoplamento	S														Crítico
4	8 Segmentos radiais	S														Crítico
	Cuba	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Labirinto	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Óleo	S														Crítico
	Visor de nível de óleo	N	N	S												Crítico
5	Carter	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Permutador	S														Crítico
	Caudalímetro	N	N	S												Crítico
6	8 Patins axiais	S														Crítico
	Cuba	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Óleo	S														Crítico
	Disco de impulso axial	S														Crítico
	Molas de sustentação	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Visor de nível de óleo	N	N	S												Crítico
7	Carter	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Crítico
	Permutador	S														Crítico
	Caudalímetro	N	N	S												Crítico

Subsist.	Posição funcional	Questões de avaliação da criticidade											Critico ou N/Critico?		
		Produção						Seg/Amb		C/Manut.					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
8	Anel de comando	S													Critico
	Guiamento do anel de comando	S													Critico
	20 Pás diretrizes (Pás guia)	S													Critico
	20 Chumaceiras superiores das pás diretrizes	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Critico
	20 Chumaceiras inferiores das pás diretrizes	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Critico
9	20 Bielas	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Critico	
	20 Manivelas	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	S		Critico	
	2 Servomotores	S												Critico	

# **Anexo C**

Nº	Subsistema	Ano	H. de op. Ac.	componente	modo de falha
1	Sist. Acionamento do distribuidor	1963	15564	Biela (3)	Desgaste
2	Distribuidor	1967	28142	Chumaceira inferior (2)	Desgaste casquilho
3	Linha de veios	1971	28345	Acoplamento	Desapertos nos pernos
4	Sist. ref. Chumaceira de impulso	1968	32784	Permutador	Colmatação
5	Distribuidor	1969	35451	Chumaceira inferior (18)	Desgaste casquilho
6	Junta de estanqueidade	1969	36489	Anel de desgaste	Desgaste
7	Chumaceira de impulso	1969	39002	Patins axiais (3 ; 4)	Desgaste
8	Chumaceira Guia	1970	42798	Segmentos radiais (3;7)	Desgaste
9	Distribuidor	1970	43222	Chumaceira superior (18)	Desgaste casquilho
10	Distribuidor	1973	58616	Chumaceiras inferiores (4; 17)	Desgaste casquilho
11	Chumaceira Guia	1973	62473	Segmentos radiais (2)	Desgaste
12	Roda	1974	67987	Roda	Vibração
13	Linha de veios	1973	68423	Acoplamento	Fadiga
14	Sist. ref. Chumaceira de impulso	1977	82105	Permutador	Corrosão
15	Distribuidor	1980	100699	Chumaceira superior (18)	Desgaste casquilho
16	Chumaceira de impulso	1981	107361	Patins axiais (4)	Desgaste
17	Sist. Acionamento do distribuidor	1982	113995	Biela (8)	Desgaste
18	Chumaceira de impulso	1984	119796	Patins axiais (4;5;8)	Desgaste
19	Sist. ref. Chumaceira de impulso	1984	121186	Permutador	Colmatação
20	Linha de veios	1978	138879	Acoplamento	Fadiga
21	Sist. Ref. Chumaceira Guia	1989	145892	Permutador	Colmatação
22	Chumaceira de impulso	1989	148741	Molas	Fadiga
23	Chumaceira Guia	1990	150161	Segmentos radiais (4;1;5)	Desgaste
24	Chumaceira Guia	1991	154946	Segmentos radiais (8)	Sobreaquecimento
25	Junta de estanqueidade	1992	159946	Molas de compressão	Fadiga
26	Junta de estanqueidade	1995	174735	Anel de desgaste	Desgaste
27	Sist. Ref. Chumaceira Guia	1997	183105	Permutador	Colmatação
28	Roda	1988	188211	Pás	Erosão/ Cavitação

Nº	Subsistema	Ano	H. de op. Ac.	componente	modo de falha
29	Chumaceira Guia	1999	193620	Segmentos radiais (6)	Desgaste
30	Distribuidor	2003	212697	Guiamento do anel de comando	Corrosão
31	Sist. Acionamento do distribuidor	2004	215640	Manivela (17)	Desgaste
32	Junta de estanqueidade	2005	222057	Molas de compressão	Fadiga
33	Chumaceira de impulso	2007	227685	Patins axiais (1;3)	Desgaste
34	Distribuidor	2007	228003	Chumaceira inferior (5)	Desgaste Casquilho
35	Sist. Ref. Chumaceira Guia	2007	228948	Permutador	Corrosão
36	Chumaceira de impulso	2007	231252	Patins axiais (2)	Desgaste
37	Sist. ref. Chumaceira de impulso	2012	252639	Permutador	Colmatação
38	Chumaceira Guia	2015	263894	Segmentos radiais (3)	Desgaste
39	Roda	2015	266556	Pás (12; 15)	Fadiga
40	Chumaceira de impulso	2016	268821	Patins axiais (5; 6)	Desgaste

# **Anexo D**

### Análise dos modos de falha da turbina do grupo 2 da Central EDP

