

Aplicação da Metodologia RCM em Equipamentos de Tomografia Computorizada e da Especialidade de Imagiologia

João Pedro Rodrigues Ribeiro

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral (ISEL)
Doutor Rui Manuel Assis Monteiro (ULHT)

Júri:

Presidente: Doutora Cecília Ribeiro da Cruz Calado (ISEL)
Vogais: Doutor Luís António de Andrade Ferreira (FEUP)
Doutor Rui Manuel Assis Monteiro (ULHT)



INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA



**ESCOLA SUPERIOR DE
TECNOLOGIA DA SAÚDE
DE LISBOA**
INSTITUTO POLITÉCNICO DE LISBOA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa

Aplicação da Metodologia RCM em Equipamentos de Tomografia Computorizada e da Especialidade de Imagiologia

João Pedro Rodrigues Ribeiro

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral (ISEL)
Doutor Rui Manuel Assis Monteiro (ULHT)

Júri:

Presidente: Doutora Cecília Ribeiro da Cruz Calado (ISEL)
Vogais: Doutor Luís António de Andrade Ferreira (FEUP)
Doutor Rui Manuel Assis Monteiro (ULHT)

Fevereiro de 2019

É geralmente reconhecido que as Unidades de Cuidados de Saúde (UCS) são alvo de uma fatura anual considerável com origem nos seus Serviços de Manutenção Interna (SMI). É também reconhecido que a gestão da manutenção de equipamentos biomédicos, como, por exemplo, os da especialidade de imagiologia, são objeto de procedimentos de manutenção, ao longo do seu ciclo de vida, definidos e implementados unicamente pelos seus fabricantes.

Embora a Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM) seja aplicada com sucesso há muito tempo em equipamentos da área industrial, proporcionando melhorias significativas em eficácia e eficiência, não o é contudo em equipamentos biomédicos da área da saúde. Verifica-se mesmo uma quase inexistência de estudos ou análises na gestão deste tipo de equipamentos.

Surge assim uma oportunidade para esta dissertação, face à necessidade, de garantir níveis elevados de fiabilidade, disponibilidade, segurança e economia nesta vertente de equipamentos biomédicos. É com este objetivo que o presente trabalho foi desenvolvido, recorrendo-se aos conceitos e metodologia RCM para os aplicar a um equipamento da especialidade de imagiologia, especificamente, a um equipamento de Tomografia Computorizada (TC).

Esta abordagem, embora fazendo uso de metodologias de análise já existentes e conhecidas na engenharia da manutenção, incorpora atualmente uma nova revolução industrial – a Indústria 4.0. Neste sentido, face aos contínuos avanços tecnológicos proporcionados pela digitalização e sensorização, reforça-se a necessidade de implementar políticas de manutenção adequadas a cada momento do ciclo de vida de um qualquer equipamento, proporcionando fiabilidade e disponibilidade otimizadas e contribuindo para a minimização dos custos de manutenção.

A ampola de raios X de um modelo específico de TC foi selecionada para esta análise, tendo em conta o seu comportamento em falha devido a vários modos concorrentes. Na impossibilidade de implementação de sensorização e, logo, de adoção da política de manutenção preventiva condicionada *online*, explorou-se a possibilidade de adoção da política de manutenção preventiva sistemática. Tendo em conta a natureza estocástica do problema, recorreu-se à técnica de simulação de Monte-Carlo, de modo a analisar o comportamento em falha resultante do conjunto dos vários modos atuantes na ampola e determinar a periodicidade ótima económica da sua substituição preventiva.

No seguimento da vertente económica, esta análise foi estendida a duas outras circunstâncias comuns e complementares em manutenção de equipamentos:

- Antecipar ou não a substituição preventiva de um componente, aproveitando a paragem do equipamento ao qual pertence, quando ocorre uma falha noutra componente;
- Manter um componente crítico caro (ampola de raios X) em *stock* ou adquiri-lo somente de cada vez que se verificar a sua falha.

O caso aqui estudado permitiu concluir como é importante para os utilizadores de equipamentos médicos realizarem os seus próprios estudos, recorrendo a métodos científicos comprovados, de modo a adaptarem continuamente as políticas de manutenção às condições específicas que se possam deparar durante a fase de exploração daqueles, na prossecução da máxima disponibilidade, segurança e eficiência económica.

Palavras-Chave

Disponibilidade, Fiabilidade, Manutenção, RCM, Tomografia Computorizada

ABSTRACT

It is generally recognized that in Health Care Units the internal maintenance service usually results in a significant annual bill. In a similar way the management of biomedical equipment are also under maintenance procedures throughout their life cycle, usually defined and implemented by their manufactures. As an example of this we have the imaging equipment.

Although Reliability Centred Maintenance (RCM) methodology has been successfully applied for a long time upon industrial equipment, providing significant improvements in efficiency and effectiveness, the same is not verified in biomedical equipment for health purposes. It is verified a lack of studies or analysis about the management of this type of equipment.

Based on this, raises an opportunity for this dissertation to fulfil the necessity of assuring high levels of reliability, availability, safety, and economy in the biomedical equipment field. It is with this purpose that the present work was developed using the concepts and RCM methodology upon a specific imaging equipment, a Computed Tomography (CT) scan.

This approach uses existing and known methodologies on the field of maintenance engineering, including some recent concepts regarding the fourth industrial revolution - Industry 4.0. In this sense and facing the continuous technological advances using digitalisation and sensing instrumentation, there is an increased need to implement adequate maintenance policies in every stage of an equipment life cycle, providing an optimized reliability and availability contributing to the minimisation of maintenance costs.

For this analysis we selected an X-ray tube of a specific CT model considering its failure behaviour due to several competing modes. In the impossibility to implement a sensor system and, therefore, to adopt an online condition based maintenance policy, it was explored the possibility of adopting a systematic preventive maintenance policy. Considering the stochastic nature of the problem the Monte-Carlo simulation technique was used in order to analyse the failure behaviour resulting from all several modes acting on the X-ray tube and to determine the optimal economic periodicity of its preventive substitution.

In the scope of the economic aspect this analysis was extended to other two common and complementary circumstances about equipment maintenance:

- To anticipate, or not, the preventive replacement of a certain component by using the moment when the equipment stops when a failure occurs in any other component;
- To keep an expensive critical component (X-ray tube) in stock or to purchase it only each time it is found to be defective.

The case study under analysis shows how important is for the users of medical device to carry out their own studies using proven scientific methods in order to continuously adapt maintenance policies to specific conditions that may arise during the equipment's life cycle and pursuing maximum availability, safety, and economic efficiency.

Keywords

Availability, Reliability, Maintenance, RCM, Computed Tomography

AGRADECIMENTOS

- Os meus sinceros agradecimentos vão para todos aqueles que me disseram que eu não conseguiria e para aqueles que me disseram que iria conseguir.

- Em primeiro lugar gostava de agradecer ao Professor Doutor Rui Assis e Professor Doutor José Sobral, pela orientação. As opiniões assertivas, transmissão de conhecimentos e experiências foram determinantes para a realização desta dissertação. No último ano tive o privilégio de com eles poder participar, na qualidade de orador, nas Jornadas da Manutenção 2018 realizadas na EXPONOR. O meu sincero e profundo agradecimento pela oportunidade.

- Gostava também de agradecer a todos os docentes que lecionaram este Mestrado de Engenharia Biomédica, e em especial à Professora Doutora Cecília Calado, pelo incentivo e coragem que me deu ao longo deste percurso.

- Às minhas colegas de curso Margarida Cardoso e Patrícia Dias, pelo estímulo e amizade demonstrada desde o início desta caminhada, fomos, somos e seremos aquele grupo “*nerds de 20*”, pelo menos as recordações assim o confirmam.

- Uma palavra de agradecimento e admiração ao meu colega de curso, e, grande amigo que “ganhei” nesta inflexão académica e profissional, Luís Marques o meu muito obrigado.

- Como não podia deixar de ser, um agradecimento muito especial à Vanessa Mota, colega de curso, e à *Siemens Healthineers Portugal*, nomeadamente ao seu responsável do setor de equipamentos biomédicos de imagiologia, o Senhor Engenheiro Carlos Caldeira por me facultar alguns elementos referentes ao equipamento estudado.

- Finalmente, e com a maior importância agradeço à minha família, aos que cá estão e aos que já partiram, pois nas nossas memórias e no quotidiano todos continuam entre nós. Espero em breve entregar-te aquele abraço dizendo – Mãe, conseguimos!

- Dedico este trabalho à minha luz inspiradora de dois anos, João Henrique.

RESUMO	I
ABSTRACT	III
AGRADECIMENTOS.....	V
Índice	VII
Índice de Figuras	XI
Índice de Tabelas.....	XV
Lista de Abreviaturas.....	XVII
Capítulo 1.....	1
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2.....	7
2. Manutenção.....	7
2.1. Evolução Histórica da Revolução Industrial	7
2.2. Tipos de Manutenção	18
2.3. Conceito de Fiabilidade.....	21
2.3.1. Fiabilidade Intrínseca e Extrínseca	22
2.3.2. Fiabilidade Humana	23
2.3.3. Fiabilidade Condicional (ou de Missão)	23
2.3.4. Fiabilidade de Componentes	25
2.3.5. Fiabilidade de Sistemas.....	26
2.3.5.1. Sistemas Série.....	27
2.3.5.2. Sistemas Paralelo.....	27
2.4. Conceito de Manutibilidade.....	29
2.5. Conceito de Disponibilidade	31
Capítulo 3.....	35

3. Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM)	35
3.1. História da Metodologia RCM	36
3.2. Princípios da metodologia RCM	38
3.3. O processo da metodologia RCM.....	39
3.4. Benefícios da implementação da metodologia RCM	42
3.5. O impacto da metodologia RCM no custo do ciclo de vida dos ativos físicos.....	42
3.6. Áreas de aplicação da metodologia RCM	43
3.6.1. Instalações hospitalares	44
3.6.2. Equipamentos biomédicos.....	46
Capítulo 4.....	49
4. Análise Estatística	49
4.1. Metodologia para estimação paramétrica de distribuições estatísticas.....	49
4.1.1. Passo 1: Recolha de dados	51
4.1.2. Passo 2: Análise preliminar de dados.....	51
4.1.3. Passo 3: Seleção e validação da distribuição.....	53
4.1.3.1. Método gráfico	55
4.1.3.2. Teste de Laplace.....	55
4.1.3.3. Teste de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	57
4.1.3.4. Teste do Qui-Quadrado	58
4.1.4. Passo 4: Estimação dos parâmetros da distribuição	61
4.1.4.1. Método da Regressão (ou Método dos Mínimos Quadrados)	61
4.1.4.2. Método da Máxima Verosimilhança	64
4.2. Distribuições estatísticas mais comuns em fiabilidade.....	65
Capítulo 5.....	77
5. Fundamentos Teóricos da Radiação Ionizante	77
5.1. Enquadramento.....	77
5.2. Produção de Raios X	79
5.3. Tomografia Computorizada.....	81
5.4. Princípio de funcionamento da ampola de raios X.....	82
5.5. Ampola de raios X - <i>Straton</i> ®.....	83
Capítulo 6.....	87
6. Caso de Estudo	87
6.1. Enquadramento.....	87
6.2. FMEA.....	89
6.3. Diagrama de decisão RCM.....	89

6.4. Seleção da política de manutenção para o componente crítico	91
6.4.1. Passo 1: Recolha de dados	91
6.4.2. Passo 2: Análise preliminar de dados.....	92
6.4.3. Passo 3: Seleção e validação da distribuição.....	92
6.4.4. Passo 4: Estimação dos parâmetros da distribuição	101
6.4.5. Modos de Falha Concorrentes ou Competitivos	103
6.4.6. Sobressalente do componente crítico	113
6.4.7. Manutenção de Oportunidade	121
Capítulo 7.....	125
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	125
7.1. Conclusões.....	125
7.2. Trabalhos Futuros.....	127
Referências Bibliográficas	129
Anexo 1 – Ficha técnica da TC.....	133
Anexo 2 – Estrutura da Tabela FMEA	135
Anexo 3 – Tabela FMEA.....	137
Anexo 4 – Diagrama de Decisão RCM	153
Anexo 5 – Recolha e Ajustamento de Dados dos MDF	161
Anexo 6 – Valor crítico para o teste de KS (n.s.=5%).....	163
Anexo 7 – Valor crítico para o teste de QQ (n.s.=5%).....	165

Índice de Figuras

Figura 2.1: Evolução da Revolução Industrial (Rodrigues et al., 2017).	7
Figura 2.2: Evolução das técnicas de manutenção, adaptado de Moubray (1997) e Correia et al., (2016).....	9
Figura 2.3: Ferramentas Tecnológicas da Indústria 4.0 (Correia et al., 2016).	10
Figura 2.4: Cadeia de valor da Indústria 4.0, adaptado de Correia et al. (2016).	11
Figura 2.5: Estrutura dos sistemas das fábricas na Indústria 3.0 e na Indústria 4.0. (F: Fábrica, M: Máquina, C: Componente), adaptado de Lee et al. (2018).	12
Figura 2.6: Impressão 3D do coração (Gulezian, 2015).....	16
Figura 2.7: Nano robôts guiados (Cancer-Fighting Nanorobots, 2018).	16
Figura 2.8: Apoio à cirurgia do fígado através de realidade aumentada (Soler, 2018).	17
Figura 2.9: Mão protética impressa em 3D (Soler, 2018).	17
Figura 2.10: Políticas de manutenção, adaptado de Assis (2014).	18
Figura 2.11: Ação de manutenção após surgir a falha, adaptado de Silva (2016).....	19
Figura 2.12: Ação de MPC, com inspeções periódicas (Silva, 2016).	20
Figura 2.13: Intervalos dos períodos <i>P-F</i> e <i>M-F</i> (Assis, 2014).....	21
Figura 2.14: Representação gráfica de uma PDF de falha	22
Figura 2.15: Probabilidade condicionada de falha durante a missão Δt tendo sobrevivido até T	24
Figura 2.16: Diagrama lógico de um sistema tipo série	27
Figura 2.17: Diagrama lógico de um sistema tipo paralelo (ativo total)	28
Figura 2.18: Diagrama lógico de um sistema tipo Paralelo Restrito (k/n)	28
Figura 2.19: Relação entre Disponibilidade, Manutibilidade e Fiabilidade (Sobral, 2010).	32
Figura 3.1: Seis padrões de falha, adaptado de Moubray (1997).	36
Figura 3.2: Tabela de análise FMEA (Assis, 2014).	39
Figura 3.3: Diagrama de decisão de RCM (fluxograma 1), adaptado de Assis (2014).	40
Figura 3.4: Diagrama de decisão de RCM (fluxograma 2), adaptado de Assis (2014).	41
Figura 3.5: As quatro fases do LCC, adaptado de Rausand (2004).	43
Figura 4.1: Metodologia para estimação paramétrica de distribuições estatísticas.	50
Figura 4.2: Dados completos de falha (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).....	52
Figura 4.3: Dados censurados à direita (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).	52
Figura 4.4: Dados censurados à esquerda (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).	52
Figura 4.5: Dados censurados por intervalo (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).....	52
Figura 4.6: Sequência de falhas em dois componentes (Assis, 2014).	53
Figura 4.7: Possível tendência dos TTF	54
Figura 4.8: Número acumulado de falhas em função do tempo.	55

Figura 4.9: Z de teste e respectivos limites de aceitação e rejeição.	56
Figura 4.10: Exemplo de regressão linear em x e em y, adaptado de ReliaSoft (2014b).....	61
Figura 4.11: Representação gráfica das funções f(t), F(t), R(t), h(t) (Assis, 2014).....	69
Figura 4.12: Função f(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0	70
Figura 4.13: Função h(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0	70
Figura 4.14: Função F(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0	71
Figura 4.15: Função R(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0	71
Figura 4.16: Função f(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro α	72
Figura 4.17: Função h(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro α	72
Figura 4.18: Função F(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro α	73
Figura 4.19: Função R(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro α	73
Figura 4.20: Função f(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro β	74
Figura 4.21: Função h(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro β	75
Figura 4.22: Função F(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro β	75
Figura 4.23: Função R(t) de Weibull para diferentes valores do parâmetro β	75
Figura 5.1: Espectro de radiação eletromagnética, adaptado de (Wave & Wave, 2005).....	77
Figura 5.2: Danos causados nas moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) pela radiação ionizante (Hsieh, 2009).....	78
Figura 5.3: Produção de raios X característicos, adaptado de (Bushberg et al., 2012).	79
Figura 5.4: Radiação de <i>Bremsstrahlung</i> , adaptado de (Bushberg et al., 2012).....	79
Figura 5.5: TC dupla fonte dupla energia – <i>SOMATOM Definition Flash</i> (Siemens Healthineers, 2018).....	81
Figura 5.6: Configuração do par ampoladetector da TC de dupla fonte dupla energia.....	81
Figura 5.7: Princípio de funcionamento de uma ampola de raios X, adaptado de (Bushberg et al., 2012).....	82
Figura 5.8: Instalação em chassi da ampola <i>Straton</i> , adaptado de (Behlig, 2016).	83
Figura 5.9: Princípio de funcionamento da ampola <i>Straton</i> , adaptado de (Schardt et al., 2004).	83
Figura 5.10: Interior do chassi e da ampola <i>Straton</i> , adaptado de (Behlig, 2016).	84
Figura 5.11: Detalhe do cátodo. Emissor de elétrons com 5 mm de diâmetro de Tungstênio, adaptado (Schardt et al., 2004).....	85
Figura 5.12: Deflexão axial e deflexão tangencial do feixe de elétrons no ânodo, adaptado (Behlig, 2016).....	85
Figura 5.13: Esquema do sistema magnético de dipolos r, phi e quadripolo q, adaptado (Schardt et al., 2004).....	85
Figura 5.14: Trajetória de elétrons entre cátodo e ânodo, através dos dipolos de deflexão e quadripolo focal, adaptado (Schardt et al., 2004).	85

Figura 6.1: Visão geral de uma sala de exames de TC (Siemens Healthineers, 2018).	88
Figura 6.2: Z de teste e respetivos limites para UCS1	93
Figura 6.3: Evolução temporal das falhas para UCS1.....	94
Figura 6.4: Z de teste e respetivos limites para UCS3	95
Figura 6.5: Evolução temporal das falhas para UCS3.....	95
Figura 6.6: Z de teste e respetivos limites para UCS4	96
Figura 6.7: Evolução temporal das falhas para a UCS4.....	96
Figura 6.8: Z de teste e respetivos limites para UCS6	97
Figura 6.9: Evolução temporal das falhas para UCS6.....	97
Figura 6.10: Distribuição teórica de <i>Weibull</i> (2P) do MDF1	99
Figura 6.11: Distribuição teórica de <i>Weibull</i> (2P) do MDF2	100
Figura 6.12: Distribuição teórica de <i>Weibull</i> (2P) do MDF3	101
Figura 6.13: Exemplo de uma iteração do simulador MDFC.....	106
Figura 6.14: Distribuição em frequência dos TTF no conjunto dos três MDF.....	107
Figura 6.15: Distribuição de frequências relativas acumuladas no conjunto dos três MDF	107
Figura 6.16: Custo de manutenção em função da periodicidade de MPS	110
Figura 6.17: Comparação entre um componente com três MDF e um sistema série	111
Figura 6.18: Simulador Sobressalentes com os dados introduzidos.....	115
Figura 6.19: Exemplo de uma iteração do Simulador Sobressalentes.....	118
Figura 6.20: Intervenção alternativa de não antecipar a MPS	123
Figura 6.21: Intervenção alternativa de antecipar a MPS	123
Figura 6.22: Programa de Antecipação de MPS para apoio à decisão	124

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Proporcionalidade entre padrões e probabilidades condicionais de falha, adaptado de Dunn (2003).....	37
Tabela 4.1: Tabela resumo de expressões das distribuições estatísticas	64
Tabela 6.1: Quantidade de TC <i>Siemens Somatom Definition Flash</i> , instaladas entre 2006 e 2017.	91
Tabela 6.2: Dados de TTF's ajustados para UCS 1.....	93
Tabela 6.3: Dados de TTF's ajustados para UCS 3.....	94
Tabela 6.4: Dados de TTF's ajustados para UCS 4.....	95
Tabela 6.5: Dados de TTF's ajustados para UCS 6.....	97
Tabela 6.6: Dados de TTF relativamente ao MDF1	98
Tabela 6.7: Dados de TTF relativamente aos MDF2	99
Tabela 6.8: Dados de TTF relativamente aos MDF3	100
Tabela 6.9: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF1.....	101
Tabela 6.10: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF2.....	102
Tabela 6.11: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF3.....	102
Tabela 6.12: Parâmetros da distribuição de <i>Weibull</i> para os MDF1, MDF2 e MDF3	103
Tabela 6.13: Características operacionais consideradas.....	105
Tabela 6.14: Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade.....	108
Tabela 6.15: Características operacionais consideradas com custo moderado da ampola	109
Tabela 6.16: Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade.....	109
Tabela 6.17: Análise de sensibilidade entre os três MDF e o MDF Predominante.....	112
Tabela 6.18: Análise de sensibilidade entre os três MDF idênticos e o MDF Predominante	113
Tabela 6.19: Características operacionais consideradas.....	116

Lista de Abreviaturas

-A-

ADN	Ácido desoxirribonucleico
ALARA	As Low As Reasonable Achievable
ALDT	Administrative Logistic Delay Time
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

-B-

-C-

CIPR	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
CO	Custos de Oportunidade
COCIR	European Coordination Committee of the Radiological, Electromedical and Healthcare IT Industry

-D-

D_i	Disponibilidade Intrínseca
ddp	Diferença de potencial
DM	Departamentos de Manutenção
D_o	Disponibilidade Operacional
D_r	Disponibilidade Realizada

-E-

-F-

FMEA	Failure Modes and Effect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis

-G-

-H-

HAZOP	Hazard and Operability
-------	------------------------

-I-

IBM	International Business Machines
iid	independente e identicamente distribuída
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization

-J-

JIT	Just-in-Time
-----	--------------

-K-

-L-

LCC	Life Cycle Cost
LCM	Lean Centered Maintenance
LRU	Lower Replacement Unit

-M-

MC	Manutenção Corretiva
MDF	Modo de Falha
MDFC	Modo de Falha Concorrentes
MDO	Mão-de-Obra

MDT	Mean Down Time
m-HFMEA	Modified Healthcare Failure Modes and Effect Analysis
MPC	Manutenção Preventiva Condicionada
MPD	Manutenção Preventiva Detetiva
MPS	Manutenção Preventiva Sistemática
MTTF	Mean Time To Failure
MTTM _(MC)	Mean Time To Maintenance, em ações corretivas
MTTM _(MC+MPS)	Mean Time To Maintenance, em ações corretivas e preventivas
MTTM _(MPS)	Mean Time To Maintenance, em ações preventivas
MTTR	Mean Time To Repair
MTTR _(MC)	Mean Time To Repair, em ações corretivas
MTTR _(MC+MPS)	Mean Time To Repair, em ações corretivas e preventivas
MTTR _(MPS)	Mean Time To Repair, em ações preventivas
MUT	Mean Up Time
-N-	
NP EN	Norma Portuguesa European Norm
NRP	Número de Risco Prioritário
-O-	
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OT	Ordens de Trabalho
-P-	
PAF	Função Probabilidade Acumulada de Falha
PDF	Função Densidade de Probabilidade de Falha
PPH	Processo Poisson Homogéneo
PPNH	Processo Poisson Não Homogéneo
-Q-	
-R-	
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety
RCM	Manutenção Centrada na Fiabilidade
REM	Radiação Eletromagnética
ROCOF	Rate of Occurrence of Failures
RTA	Root Cause Analysis
-S-	
SBA	Safety Barrier Analysis
SMI	Serviços de Manutenção Interna
SN	Sobressalente Não
SS	Sobressalente Sim
-T-	
TC	Tomografia Computorizada
TPM	Total Productive Maintenance
TTF	Time To Failure
TTR	Time To Repair
-U-	
UCS	Unidades de Cuidados de Saúde

-V-

VA

Vulnerability Analysis

-X-

-Y-

-Z-

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O desenvolvimento dos últimos anos da rede hospitalar tem sido acompanhado por um crescimento paralelo do parque de equipamentos biomédicos, alguns dos quais implicando elevados investimentos. Ao longo dos anos este crescimento tem sido efetuado sem um controlo tão rigoroso quanto seria desejável em proveito da eficiência, no que se refere à aquisição e à renovação de equipamento, em particular em especialidades como Medicina Nuclear, Medicina Hiperbárica, Radiologia e Radio-oncologia (Penedo et al., 2013).

Atualmente em medicina, a informação clínica complementar é obtida com recurso a meios de diagnóstico e sistemas de informação e comunicação. As valências de um diagnóstico por imagem, como a TC, assumem um papel de destaque e criticidade em todas as fases de prestação de cuidados de saúde: rastreio, diagnóstico, intervenção e *follow up* (Silva, 2014).

O impacto da evolução tecnológica em TC evidenciou-se no aumento da aplicabilidade clínica e na crescente procura da valência por diversas especialidades médicas (ex. neurologia, trauma, cardiologia), quer em meio intra-hospitalar, quer em ambulatório, com o subsequente crescimento no número de exames realizados em todo o mundo (Silva, 2014).

Segundo Crispim & Vieira (2014), o recurso à TC tem aumentado anualmente desde a sua introdução na medicina em 1972. A evolução tecnológica permitiu que se assumisse atualmente como uma das modalidades de imagem mais importantes na medicina atual. Tal evidência manifesta-se na crescente procura e no aumento do número de equipamentos instalados em Portugal e no mundo.

O número de equipamentos de TC instalados em Portugal superou a média da EU 27 em 61,5% e a média da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) em 78,2%. Em 2011 existiam 203 equipamentos de TC instalados em meio hospitalar em Portugal, correspondendo a uma proporção de 19,23 equipamentos por milhão de habitantes (Crispim & Vieira, 2014).

Paralelamente, destacam-se os Departamentos de Manutenção (DM), onde apresentam extrema importância no universo de uma empresa, de um grupo de empresas ou mesmo de hospitais, que pretendam atingir as metas a que se propõem (Farinha, 2016a).

No caso dos hospitais e da indústria farmacêutica, a manutenção de equipamentos é uma atividade ainda mais exigente, pois apresenta uma estreita relação com a saúde das pessoas, há uma grande variedade e sofisticação de equipamentos e requer uma coordenação apertada nas relações entre os gestores dos serviços e equipamentos, prestadores de serviços externos e internos, e os profissionais técnicos que manipulam tais equipamentos (Farinha, 2016a).

A manutenção hospitalar e farmacêutica tem um papel importantíssimo no controlo dos trabalhos, sejam de natureza interna ou externa de modo a garantir um serviço de qualidade por parte das instalações e equipamentos, tendo sempre em atenção o seu ciclo de vida (Farinha, 2016a).

Atualmente os sistemas de informação na manutenção desempenham um papel primordial, contribuindo para a sua rápida evolução, no entanto e na maioria das utilizações, tornou-se apenas numa ferramenta de base no apoio à gestão da manutenção. Neste momento as empresas pretendem ir muito mais longe nas ferramentas de apoio que exigem à gestão e manutenção dos seus ativos físicos, pretendendo uma gestão que começa na decisão da sua aquisição e vai até ao instante da sua substituição e/ou renovação como novo, e início de um novo ciclo (Farinha, 2016b).

Adicionalmente, espera-se ainda que este tipo de sistemas se possam integrar em redes industriais para recolher dados de funcionamento dos ativos, bem como receber leituras de sensores e de sistemas diversos, tais como vibrações, temperaturas, entre outros (Farinha, 2016b).

Torna-se assim possível acompanhar *online* o estado de saúde das instalações, equipamentos e inclusivamente dos seus componentes, originando uma nova realidade que permite obter um grande rigor nos acompanhamentos do seu ciclo de vida e por consequência, do seu custo do ciclo de vida, do inglês *Life Cycle Cost* (LCC) (Farinha, 2016b).

A gestão dos ativos desempenha assim um papel importantíssimo, integrando-se numa economia dita circular, assumindo não só um papel fundamental na fase de exploração dos ativos físicos, como também participa ativamente noutras etapas, como por exemplo na fase de abate ou desmantelamento, onde os resíduos numa Economia Linear, são transformados em recursos numa Economia Circular (Ferreira & Sobral, 2018).

Aplicando a metodologia RCM, sempre numa perspectiva de melhoria contínua, tem permitido melhorar o desempenho dos equipamentos e a sua circularidade, através de uma maior disponibilidade, evitando falhas com consequências graves (Ferreira & Sobral, 2018).

O responsável pela gestão dos ativos médicos de um hospital ou de uma indústria farmacêutica, deverá ter em atenção diversos aspetos como conhecimentos de engenharia, conhecimentos de tecnologias de saúde, práticas de gestão, informatização das informações (sistemas informáticos), aquisição de equipamentos tecnológicos com especial atenção ao respetivo ciclo de vida e coordenação de inúmeras atividades. Tendo em mente que o propósito final é o de contribuir para a constante melhoria dos cuidados médicos, através da promoção de uma elevada fiabilidade dos ativos, máxima disponibilidade e redução dos custos da própria manutenção (Silva, 2014).

1.2. Objetivos

Pretende-se transferir ferramentas científicas da área da manutenção aplicadas na indústria, para a área das UCS, permitindo analisar a fiabilidade e manutibilidade de equipamentos de imagiologia cujo custo e especificidade técnica são elevados. Foi-nos permitido analisar equipamentos de TC e assim propor objetivamente estudar o aumento da sua disponibilidade, analisando os vários Modos de Falha (MDF), a sua probabilidade de ocorrência e impacto em várias vertentes (funcionais, económicas e segurança).

Como se perspectiva aplicar o modelo de estudo desenvolvido nesta dissertação, os dados de falha considerados são factuais e de existência comprovada, pertencem a equipamentos instalados e em plena exploração - Sendo mantida a confidencialidade da proveniência, protegendo e garantindo o anonimato de todas as entidades envolvidas. Estas informações foram gentilmente confiadas pela *Siemens Healthineers Portugal*.

A metodologia aplicada para tratamento dos dados é a metodologia RCM, a mesma consiste, em encontrar resposta para sete questões que procuram identificar o que fazer em termos de manutenção neste tipo de equipamentos, isto é, seleccionar criteriosamente as políticas de manutenção mais adequadas para prevenir os MDF predominantes dos vários componentes críticos, mitigar as consequências daqueles MDF que não podem ser evitados e propor eventuais alterações de conceção que possam contribuir significativamente para melhorar a disponibilidade e/ou a segurança e/ou os custos da sua exploração.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, existindo uma interligação entre os mesmos através de uma lógica de sustentabilidade teórica dos conceitos necessários para a realização do caso de estudo. Apresentam-se alguns anexos com importância, para complementar o corpo do documento

No **Capítulo 1** faz-se um enquadramento à importância da gestão dos ativos físicos em UCS, mais propriamente de equipamentos biomédicos e expõe-se uma panorâmica sobre o estado de arte da evolução tecnológica e a importância dos DM na melhoria da eficácia e eficiência em estabelecimentos especificamente focados na área da saúde. Esta questão serviu de motivação para a realização dos objetivos descritos.

O **Capítulo 2** apresenta uma breve descrição da evolução histórica das quatro revoluções industriais até à atualidade, verifica-se a interligação e importância com a área da Saúde 4.0 e quais as perspetivas de evolução mais promissoras. Introduzem-se e definem-se alguns conceitos relativos aos vários tipos de manutenção, fiabilidade de componentes e de sistemas, manutibilidade e disponibilidade.

O **Capítulo 3** refere-se a uma introdução histórica sobre a metodologia RCM, e quais os seus princípios. Descreve-se o processo inerente à aplicação desta metodologia e identificam-se os benefícios e impactos desta aplicação no LCC de ativos em áreas industriais. Em consequência, descreve-se a aproximação que esta metodologia tem nas instalações hospitalares e equipamentos biomédicos.

No **Capítulo 4**, faz-se uma explicação teórica e necessária das ferramentas matemáticas com aplicabilidade na área da manutenção, mais propriamente na engenharia da fiabilidade. O processo desde a recolha de dados, até à obtenção dos parâmetros da função de distribuição que descreve o comportamento em falha de componentes, encontra-se descrita neste capítulo. Introduzem-se conceitos importantes sobre as funções mais utilizadas em estudos de Fiabilidade, convergindo-se detalhadamente para a função de *Weibull*.

No **Capítulo 5** faz-se uma breve descrição de fundamentos teóricos da radiação ionizante e quais as suas implicações na saúde do utente e descreve-se resumidamente o equipamento de TC.

O **Capítulo 6** apresenta um caso de estudo. Com base no trabalho realizado, identificam-se as melhores políticas de manutenção com base em RCM em equipamentos de TC e tratam-se os dados dos diversos MDF das ampolas de raios X referentes a sete equipamentos de TC semelhantes. Define-se

através de critérios técnicos e económicos a viabilidade de políticas de manutenção a adotar, a possibilidade de aquisição de sobressalentes para *stock* e a análise da manutenção de oportunidade.

Por último, no **Capítulo 7** são apresentadas as conclusões e apontadas algumas perspetivas de trabalhos futuros, com base no trabalho desenvolvido.

2. Manutenção

No presente capítulo descreve-se a evolução das quatro revoluções industriais, desde a época que surgiu até à atualidade, a sua importância e os seus impactos nas indústrias, incluindo a indústria do *healthcare*. Definem-se políticas de manutenção e introduzem-se conceitos e tipos de fiabilidade em sistemas e componentes com um ou mais MDF ou seja Modos de Falha Concorrentes (MDFC). Definem-se conceitos de manutibilidade, conceitos de disponibilidade e seus indicadores.

2.1. Evolução Histórica da Revolução Industrial

A atividade manutenção possui uma longa história e percorreu um longo caminho até chegar aos dias de hoje com o nível de desenvolvimento que atingiu. As quatro revoluções industriais estão cronologicamente identificadas na Figura 2.1.

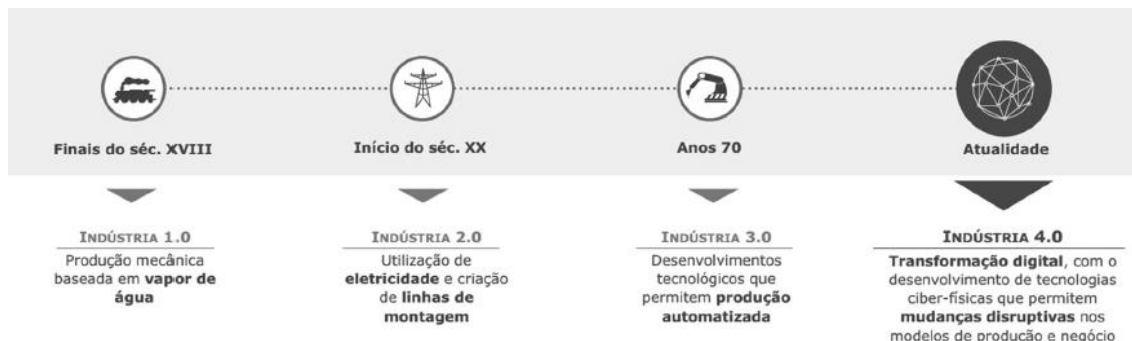


Figura 2.1: Evolução da Revolução Industrial (Rodrigues et al., 2017).

Há sensivelmente vinte anos, Moubray (1997) sugeriu terem existido três revoluções na manutenção, a primeira revolução deu-se até à Segunda Guerra Mundial. Nessa altura a indústria era pouco mecanizada e por isso apresentava-se fiável, os equipamentos existentes eram de tecnologias simples e fáceis de reparar em caso de falha. Para a maioria dos gestores, não existia a necessidade da implementação de manutenções sistemáticas, isto é, com equipas munidas de elevadas competências técnicas, apenas eram implementadas rotinas simples de manutenção como limpezas e lubrificações.

O aparecimento da segunda revolução surgiu durante a Segunda Guerra Mundial. A grande necessidade de mão-de-obra (MDO) industrial e o aumento abrupto da necessidade de bens de consumo resultou num aumento da mecanização e consequente complexidade. A indústria passou a depender fortemente das máquinas, impulsionando a ideia de que as falhas dos equipamentos podem e devem ser evitadas, apareceu assim o conceito e a aplicação de manutenção preventiva. Estas manutenções consistiam principalmente em substituições de peças, realizadas em intervalos fixos e pré determinados. É nesta altura que a manutenção começa a ter uma importância equivalente à da operação, os custos da manutenção começam a disparar em relação a outros custos operacionais. Este aumento de custos, aliado ao elevado capital investido em ativos físicos, incentivou à pesquisa de novas metodologias para maximização da vida útil destes (Moubray, 1997).

Durante a década de setenta, surge a terceira revolução alimentando novas expectativas, novos conceitos e novas técnicas. O *down time* era uma preocupação, afetava diretamente a capacidade produtiva e os respetivos custos de produção, consequentemente afetava diretamente o serviço ao cliente.

Tendencialmente, as políticas utilizadas para aquisição de componentes *just-in-time* (JIT) não satisfaziam as necessidades de *stock* que o aumento da utilização de tecnologias em grande escala careciam. Devido à crescente implementação de novas tecnologias nos ativos físicos, as falhas destes afetavam cada vez mais a capacidade de manter satisfatoriamente padrões de qualidade. Estes padrões aplicavam-se em produtos e serviços, segurança e ambiente. Mesmo pequenas falhas nos equipamentos, podiam com maior probabilidade comprometer a paragem destes ativos e por inerência, colocar em causa a capacidade de produção e mesmo a operação das organizações. Fiabilidade e disponibilidade seriam então as palavras-chave de diversos setores, incluindo o da saúde.

Perante a crescente dependência de ativos físicos mecanizados e automatizados, os mesmos obrigavam a aumentos de custos de manutenção. Custos esses que começavam a ter um peso ainda mais relevante quer em termos absolutos, quer em percentagem da despesa total das organizações.

Para se assegurar o maior retorno de investimento que os ativos físicos representavam, deveriam funcionar eficientemente durante o tempo que se pretendia que eles funcionassem.

Estava-se perante uma mudança de paradigma, isto é, em vez de se fazer o trabalho de manutenção corretamente (fazer bem o trabalho), dever-se-ia assegurar que os trabalhos planeados são os trabalhos que deveriam ser efetivamente feitos (fazer o trabalho certo). Este novo desafio incentivou ao desenvolvimento de novos conceitos, ferramentas, metodologias e técnicas de manutenção que, caso fossem bem escolhidos e respetivamente implementados, possibilitaria uma melhor *performance* dos ativos e ao mesmo tempo uma redução dos custos de manutenção.

Para além de outras, surge uma nova e importante metodologia na engenharia da manutenção, a metodologia RCM. Esta permite fornecer aos gestores de ativos a capacidade de responder a novos desafios com os quais a manutenção se depara (Moubray, 1997).

A Figura 2.2 mostra a evolução das técnicas de gestão da manutenção utilizadas, desde a primeira até à quarta revolução.

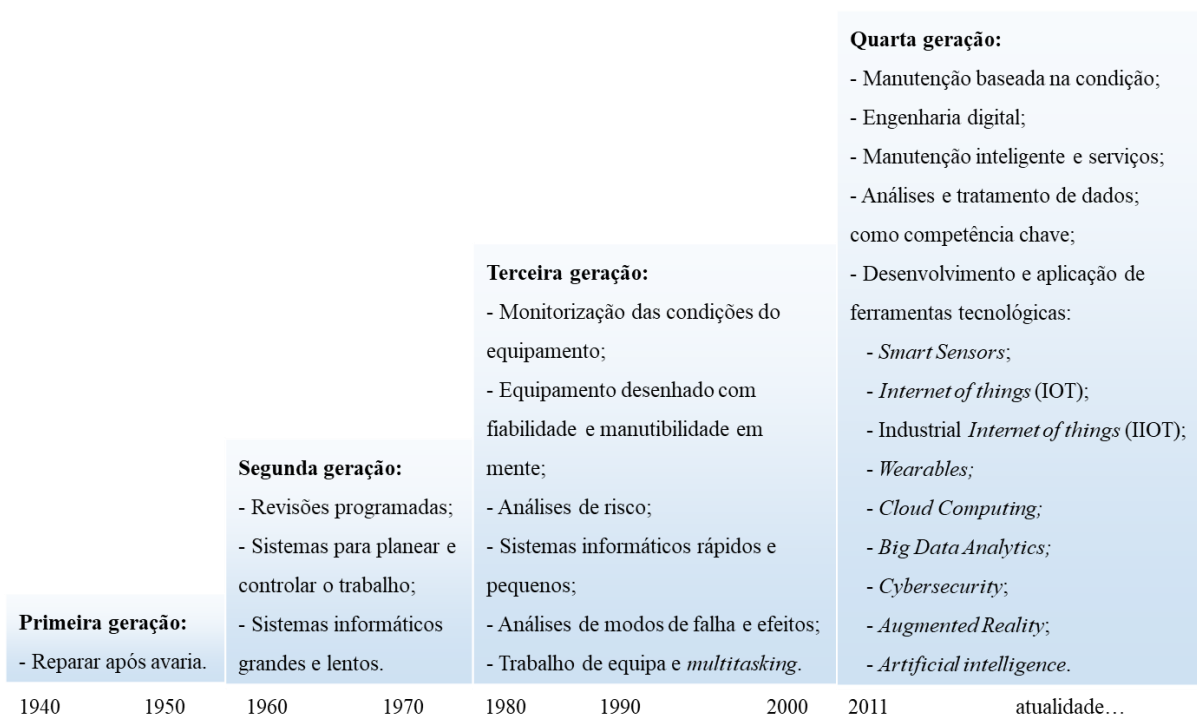


Figura 2.2: Evolução das técnicas de manutenção, adaptado de Moubray (1997) e Correia et al., (2016).

Claramente para Dunn (2003) à luz da terceira revolução da manutenção, o surgimento da quarta revolução terá como principal objetivo a eliminação de falhas, em vez de as prever ou evitar.

Em 2011 surge a quarta revolução industrial, batizada de **Indústria 4.0**. Foi introduzida pela primeira vez pelo governo alemão e foi aí que esta nova revolução nasceu e começou a ganhar forma. O surgimento da quarta revolução industrial deveu-se à necessidade do aumento da competitividade industrial (principalmente na manufatura) no mundo, ameaçada pelas economias emergentes que poderiam por em causa a continuidade da indústria alemã. Assim, um número cada vez maior de países concorrentes, capazes de ter MDO mais barata, fez com que o governo e as organizações alemãs procurassem novas soluções para manter a sua posição no mercado (Carvalho, 2017).

Para Correia et al. (2016), vive-se atualmente num mundo em que dispor da informação adequada no momento certo é uma condição imprescindível para gerir eficazmente qualquer negócio.

O foco está na total digitalização dos ativos físicos e na sua integração em ecossistemas digitais com os vários parceiros da cadeia de valor. Gerar, analisar e comunicar a informação é fundamental para fundamentar os ganhos que advêm da Indústria 4.0, que alia uma grande variedade de novas tecnologias na procura da criação de valor às empresas.



Figura 2.3: Ferramentas Tecnológicas da Indústria 4.0 (Correia et al., 2016).

Nesta economia digital onde estão disponíveis novas ferramentas tecnológicas, o cliente assume uma nova centralidade. Ao aceitar partilhar informação (dados) sobre si, obtendo em troca personalização, disponibilidade imediata, rapidez de execução, eficiência, fiabilidade e flexibilidade, torna-se mais competitivo e ágil.

Face ao rápido crescimento da tecnologia, sensores e dispositivos conetados (sensorização), resulta num contínuo fluxo de dados (*big data*, *cloud computing*, *internet of things*, *wireless*), o que *per si* se pode tornar pouco valioso, sem as devidas técnicas de análise, conforme se ilustra na Figura 2.3. É tempo de passar da fase de descoberta e mera perceção dos dados para a fase do conhecimento da informação e definição de ações decorrentes desse conhecimento (Correia et al., 2016).

Queiroga (2016) considera que atualmente as indústrias estão fortemente pressionadas para aumentar a sua competitividade e sustentabilidade, impulsionando a necessidade de investir nas

infraestruturas. A utilização de dados é fundamental para melhorar o desempenho industrial, conetando entre si todos os elementos que o compõem, é nos dias de hoje uma realidade. Na prática torna-se um verdadeiro sistema de apoio à decisão, aplicável também a operações complexas.

Para Amaral (2018) a Indústria 4.0 não se trata só da digitalização, é um processo evolutivo e natural, envolve as ciências da vida, a convergência entre o mundo físico, as tecnologias digitais, os sistemas biológicos e as ciências da vida. Em relação aos constrangimentos e ao impacto social desta revolução, o mesmo destaca as previsões de que 10% a 15% dos atuais empregos no setor industrial irão desaparecer nos próximos 10 anos, mas admite que, serão criados tantos outros.

Segundo Correia et al. (2016) existem várias oportunidades de desenvolvimento na cadeia de valor da Indústria 4.0, conforme mostra a Figura 2.4.

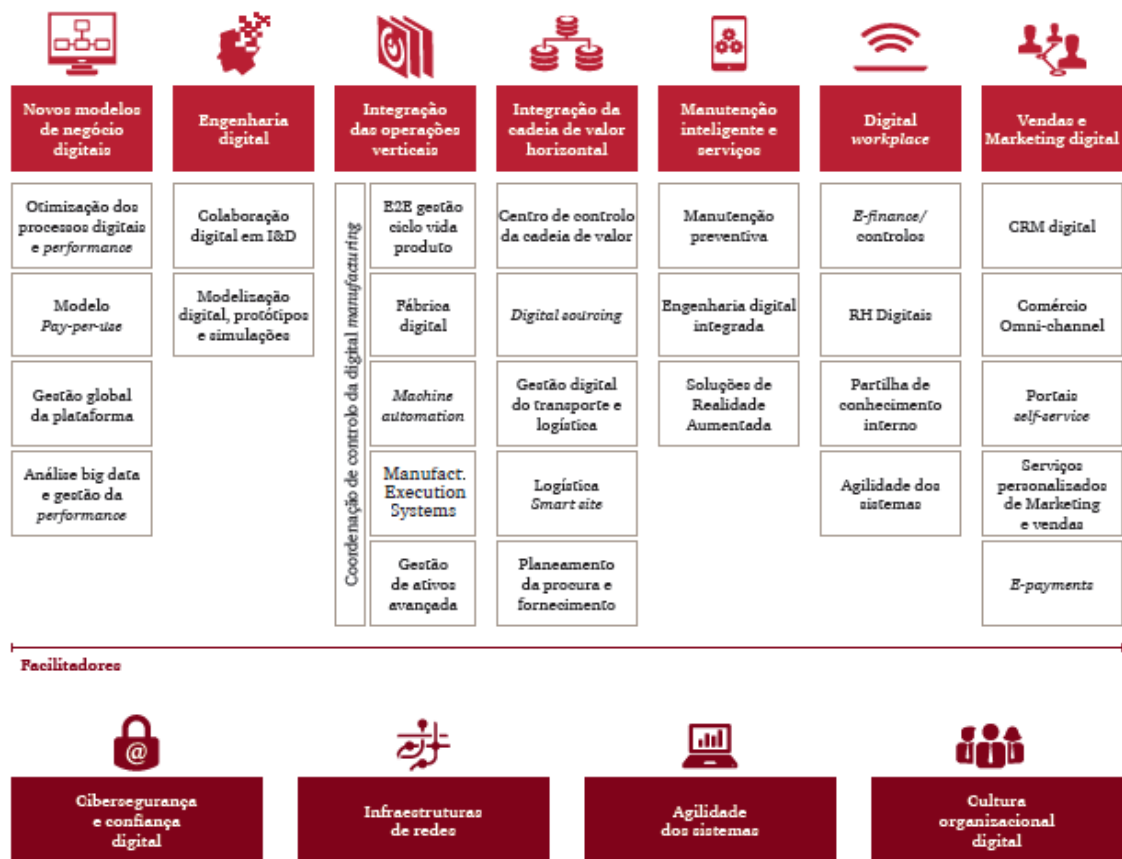


Figura 2.4: Cadeia de valor da Indústria 4.0, adaptado de Correia et al. (2016).

Integrando as cadeias de valor com o desenvolvimento de produtos, associam-se as grandes melhorias na qualidade do produto e a taxas de erro significativamente reduzidas. A capacidade de analisar os dados recolhidos dos sensores de monitorização do processo de fabrico, ao invés de utilizar

o processo de amostragem na detecção de erros, possibilita a implementação de mecanismos de correção capazes de ajustar os processos de produção em tempo real e resolver problemas de baixa complexidade.

Usando técnicas analíticas e programas de manutenção adequados, as fábricas podem evitar falhas nas máquinas e reduzir o tempo de inatividade (*down time*), aumentando assim a sua produtividade (*up time*) (Rodrigues et al., 2017).

Também Lee et al. (2018) referem que nas fábricas inteligentes, os ativos físicos (máquinas, equipamentos, componentes) cooperam juntos de forma mais autónoma e robusta, necessitam de ser continuamente monitorizados e geridos para não terem pausas na produção, assim como minimizar o *down time* causado pela falha de um componente ou equipamento. Deverão existir diferentes tipos de sensores, devidamente apropriados, para captarem informações que possibilitam monitorizar os ativos físicos em tempo real. Esses dados cuidadosamente analisados, possibilitam selecionar uma política apropriada e individualizada de manutenção, isto é, adaptada a cada ativo físico. Além disso, como uma fábrica inteligente está altamente interligada através de redes de comunicações e tecnologia de aquisição de dados (Bluetooth, RS232, Wi-Fi, etc.), como mostra a Figura 2.5, o estudo da fiabilidade dos ativos físicos, poderá ser mais aprofundado com a implementação da Indústria 4.0.

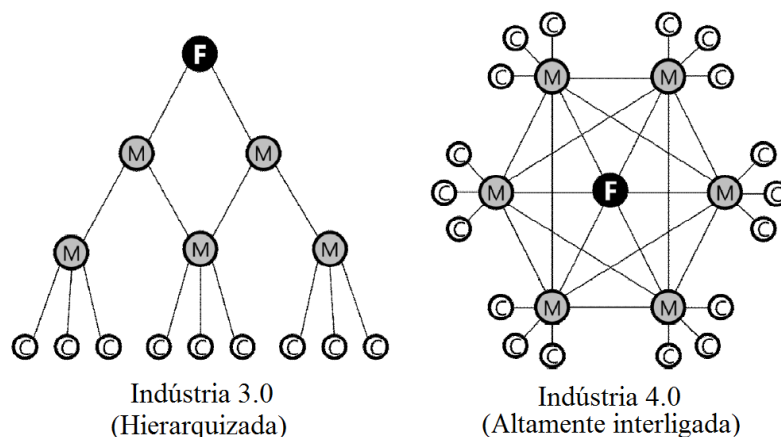


Figura 2.5: Estrutura dos sistemas das fábricas na Indústria 3.0 e na Indústria 4.0. (F: Fábrica, M: Máquina, C: Componente), adaptado de Lee et al. (2018).

Saúde 4.0

Desde que o governo alemão anunciou a quarta revolução industrial, também a Saúde 4.0 tornou-se num conceito estratégico e promissor para o setor das UCS, marca o início de uma nova era, focada em permitir a automatização e personalização de todos os processos médicos. Os principais objetivos da Saúde 4.0 são a interoperabilidade de dispositivos e serviços médicos, virtualização progressiva e assistência *online*, processamento de dados em tempo real, gestão de processos

descentralizados e a personalização dos cuidados de saúde para pacientes e profissionais (Celdrán et al., 2018).

Também poderá deixar de ser uma utopia e passar a ser uma realidade o enquadramento da logística na Saúde 4.0, será um desafio para as instituições e para os profissionais, mas claramente será uma mais-valia na gestão diária das UCS. Um conceito de informação automática no consumo ou na previsão de consumo para emitir uma informação de compra ou uma atualização de *stock* num serviço através da digitalização, sem a necessidade de ajuda humana. A utilização de tecnologia *radio-frequency identification* (RFID) ou o desenvolvimento da robótica poderá contribuir nas UCS, através do apoio na preparação de *picking* e na gestão de armazéns.

Prateleiras automatizadas? Gestão de espaço? Óculos inteligentes com informação exata da localização do artigo? Ou utilização de *drones* no transporte entre UCS e entre fornecedor e UCS?

Hoje em dia todas estas ferramentas já são uma realidade e começam a ganhar condições dentro das organizações para a sua implementação. Para efeitos imediatos, muito dificilmente existirão Hospitais 4.0 ou Logística Hospitalar 4.0, mas é certo que o futuro passa pela otimização de recursos através de ferramentas digitais e de inteligência artificial, diminuindo o tempo e o erro e maximizando os ganhos em saúde (Loureiro, 2018).

A inteligência artificial, impressão 3D, robótica, *big data*, *internet of things* (IoT), realidade aumentada, entre outras, suportadas na digitalização dos processos clássicos permitem aumentar a eficácia e eficiência aos processos relacionados com o setor das UCS, conseqüentemente abre-se um novo espaço de possibilidades. Em tratamentos cirúrgicos a robótica tem uma grande importância, no entanto em tratamentos não cirúrgicos outras tecnologias emergentes ganham relevância. Não sendo demasiadamente exaustivo, alguns exemplos significativos serão seguidamente apresentados, tal como referido em Soler (2018).

Previsões de ataques cardíacos: Na comunidade médica prever ataques cardíacos é uma tarefa difícil e muitos médicos usam diretrizes semelhantes às do Colégio Americano de Cardiologia, baseando-se essencialmente em oito fatores de risco, incluindo idade, nível de colesterol e pressão arterial. A Universidade de Nottingham do Reino Unido conduziu um estudo onde comparou o uso das diretrizes do Colégio Americano de Cardiologia com algoritmos de aprendizagem automática. Primeiro, analisaram 378.256 dados provenientes dos registos eletrónicos de doentes do Reino Unido, referentes ao ano de 2005 e usaram cerca de 80% dos dados para criar padrões e construir as próprias “diretrizes” internas. Os restantes 20% serviram de teste para prever nos próximos 10 anos quais os doentes que teriam o seu primeiro acidente cardiovascular, posteriormente compararam os valores obtidos com os

registados em 2015. As redes neuronais previram corretamente mais 7,6% de ataques cardíacos do que o método do Colégio Americano de Cardiologia e diminuíram em 1,6% os falsos ataques cardíacos. Como a previsão apoia a prevenção (através de medicação de colesterol ou alterações na dieta) muitas vidas poderiam ter sido salvas.

Diagnóstico: Desde 2013, um sistema de inteligência artificial da *International Business Machines* (IBM) dedica parte da sua atividade ao suporte na tomada de decisões sobre tratamentos de cancro, através do desenvolvimento de diagnósticos e propostas de possíveis tratamentos personalizados. O sistema analisa os dados dos doentes e compara com um histórico criado em base de dados. Esta base de dados foi criada com mais de 5.000 informações de oncologistas, cerca de 300 revistas médicas, mais de 200 livros e 12 milhões de páginas de texto. Depois de ser testado inicialmente no *Memorial Sloan-Kettering Cancer Center*, hoje vários hospitais de todo o mundo têm acesso aos serviços deste sistema para diagnóstico e tratamentos de oncologia. A concordância dos diagnósticos gerados entre o sistema de inteligência artificial da IBM e as equipas de oncologistas altamente especializados excede 90%, além de que o tempo necessário para emitir um diagnóstico de grande complexidade diminuiu de semanas para horas.

Diagnóstico por telemóvel: No início de 2017, após a criação de uma base de dados de quase 130.000 imagens de doenças de pele, uma equipa de cientistas do Laboratório de Inteligência Artificial de *Stanford* apresentou um algoritmo de diagnóstico de inteligência artificial para o cancro de pele. O resultado final foi testado e comparado com a opinião de vinte e um dermatologistas certificados. Nos diagnósticos de lesões de pele que representam cancros de pele mais comuns e fatais, o algoritmo foi compatível com o diagnóstico dos dermatologistas certificados. Como o diagnóstico é baseado em imagens, coloca-se a possibilidade da utilização da capacidade fotográfica dos *smartphones* para obter diagnósticos válidos do cancro da pele. Assim, esta equipa de desenvolvimento já está a trabalhar nesse sentido. A acessibilidade, o *interface* intuitivo do doente e a conectividade inerente dos *smartphones*, podem superar os fatores limitativos das UCS. Criam-se novas oportunidades de grande inovação, permitindo a descentralização do doente e uma maior celeridade na tomada de decisões diagnósticas.

Assistência médica remota: Nas UCS rurais ou de pequenas dimensões, é por vezes impossível ter um médico especialista disponível. Nestas situações, através de um robô nesse local e com um especialista noutra, pode ser efetuado o atendimento. Desde 2013, o robô *InTouch Vita* tem como objetivo facilitar o atendimento médico remoto. Inclui portas integradas para dispositivos de diagnóstico, como máquinas de ultrassom, estetoscópios e otoscópios, além de duas câmaras e a capacidade de navegar de forma autónoma num ambiente não estruturado.

Monitorização remota: Durante anos que existe o interesse em desenvolver tecnologia para monitorizar remotamente os doentes. Por exemplo, a monitorização à distância de sinais vitais de doentes proporciona um atendimento mais pró-ativo e torna os cuidados com a saúde mais convenientes e rápidos. Até agora, tais aplicativos eram complexos e dispendiosos. A disponibilidade atual através da diminuição dos custos dos sensores e tecnologia facilitam o aparecimento de novos produtos e serviços.

As empresas *HTC* e a *Under Armour* apresentaram um medidor de atividade cardíaca desenvolvido para os atletas para medir a intensidade do treino.

A empresa *Misfit* introduziu o *Specter*, um par de auriculares para rastreamento do sono.

A empresa *GreatCall* revelou o *Lively Wearable*, um dispositivo usado no pulso ou no pescoço que analisa a atividade cardíaca e que está simultaneamente interligado a um serviço móvel através de um botão. Assim, os doentes estão permanentemente interligados a técnicos treinados que em caso de emergência podem recorrer.

A empresa *L'Oreal* lançou um produto designado por *MyUVPatch*, um adesivo que os utilizadores podem aplicar na pele e, em seguida, rastrear a partir de um aplicativo móvel a sua exposição aos raios UV.

A empresa *Cercacor* lançou o *Ember*, um sensor de dedo que mede a pulsação e a hemoglobina, tem a possibilidade de conexão a uma aplicação via *Bluetooth*.

A empresa *Omron* estreou um novo monitor de pressão arterial que também rastreia a atividade motora e o sono, também tem a versatilidade de se interligar a uma aplicação.

A empresa *QardioCore* apresentou um monitor sem fios para registar eletrocardiogramas contínuos, frequência cardíaca, variabilidade da frequência cardíaca, frequência respiratória, temperatura da pele e dados de atividade, que podem ser partilhados com profissionais da área médica.

A empresa *Bloomlife* desenvolveu um “dispositivo de gravidez” que mede as contrações e envia-as para um *smartphone*.

Também a empresa *Bodytrak* apresentou um dispositivo que mede informações biométricas do ouvido continuamente e em tempo real, tais como a temperatura corporal, frequência cardíaca, velocidade, distância e cadência.

Modelos pré-cirúrgicos: Os modelos de planeamento pré-cirúrgico em três dimensões (3D), com base em exames de pacientes, tem vindo a ser usados em todo o mundo com o objetivo de melhorar a precisão e eficácia de cirurgias complicadas. As réplicas impressas em 3D, como na Figura 2.6, permitem aos médicos avaliar e interagir com a anatomia do doente permitindo uma preparação sem precedentes para casos cirúrgicos complexos. Assim os médicos são capazes de examinar todos os ângulos antes mesmo de iniciar a cirurgia. Os modelos específicos para pacientes impressos em 3D melhoram a cirurgia, melhoram os resultados e resultam em custos de tratamento mais reduzidos.



Figura 2.6: Impressão 3D do coração (Gulezian, 2015).

Intervenções invasivas mínimas: Os nano robôs têm um enorme potencial para aplicações em robótica médica, oferecem precisão no desempenho das operações e são minimamente invasivos para o doente. Investigadores da Universidade *Johns Hopkins* estão a desenvolver nano robôs com garras com a capacidade de aderir a tecidos específicos do corpo humano. Estes podem ser usados em procedimentos de extração para biópsias ou para a injeção localizada de drogas.

Noutra área, investigadores da Universidade de *Bristol* estão a estudar a possibilidade de um grupo de nano robôs conseguirem detetar células cancerosas, identificadas a azul na Figura 2.7 e realizar intervenções cirúrgicas não invasivas ao nível celular em doentes com tumores.

Por outro lado, investigadores do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça em Zurique estão a trabalhar com nano robôs guiados magneticamente para realizar cirurgias oculares em pacientes com cataratas e glaucomas.

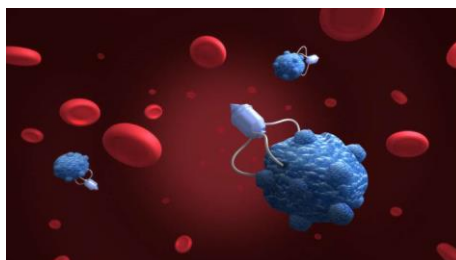


Figura 2.7: Nano robôs guiados (Cancer-Fighting Nanorobots, 2018).

Apoio cirúrgico: Uma equipa do departamento de cirurgia do aparelho digestivo e transplante hepático da *Yokohama City University*, em colaboração com o *Fraunhofer MEVIS*, desenvolveu um sistema de realidade aumentada, baseado numa aplicação para *iPad*, para dar apoio cirúrgico a operações do fígado. A aplicação, que agora está a ser clinicamente avaliada, permite o acesso a dados cirúrgicos 3D, conforme ilustra a Figura 2.8. Devido às técnicas de realidade aumentada, durante a operação, as imagens do sistema vascular são sobrepostas, de modo a permitir distinguir o padrão de circulação sanguínea no fígado, que de outro modo seria invisível à vista desarmada (a olho nú). Esta aplicação também mostra as áreas do fluxo sanguíneo e avalia em tempo real os potenciais riscos.

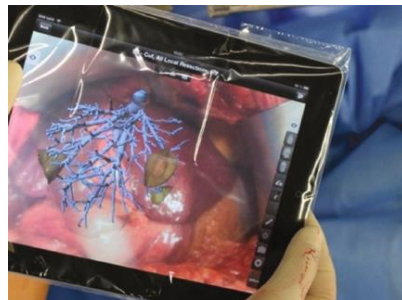


Figura 2.8: Apoio à cirurgia do fígado através de realidade aumentada (Soler, 2018).

Próteses: As plataformas de impressão 3D e de código aberto ajudam a criar dispositivos protéticos de baixo custo que os utilizadores podem adquirir por uma fração do custo das próteses comerciais tradicionais. Essas próteses, conforme se pode visualizar na Figura 2.9, podem ter uma funcionalidade reduzida, mas representam uma clara vantagem sobre as próteses comerciais. No domínio do código-fonte aberto, a magia pura pode acontecer quando designers, especialistas em robótica, fabricantes e proprietários de impressoras 3D se reúnem para fazer próteses robóticas para pessoas que de outra forma não poderiam comprá-las. O projeto *e-NABLE* envolve uma comunidade de mais de 3.200 pessoas que já criaram mais de 700 próteses para utilizadores de todo o mundo. Os projetos têm a intenção de ser o mais funcional possível, em vez de imitar o membro humano podem ser personalizados para atender às necessidades individuais (dedos, pés, braços inteiros, cotovelos, etc.). O *software* “Handomatic” permite ao utilizador projetar a sua própria prótese e obter assim os dados necessários para realização da impressão 3D, podendo ser feito pelos próprios ou por alguém desta comunidade que detenha uma impressora 3D.



Figura 2.9: Mão protética impressa em 3D (Soler, 2018).

Os exemplos apresentados anteriormente são apenas alguns exemplos do que as atuais tecnologias nos permitirão fazer durante a próxima década, o que motivará uma revolução no campo da medicina. Não será necessário esperar muito tempo para ver que as conquistas de hoje já não serão vistas apenas na ficção científica.

2.2. Tipos de Manutenção

De acordo com a norma NP EN 13306 (2007), a manutenção define-se 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*”.

Para Assis (2014), a manutenção constitui o ato de diagnosticar e reparar, ou prevenir falhas de um sistema. As intervenções de manutenção podem ser, essencialmente, de duas naturezas:

- Manutenção corretiva - em resposta a falhas casuais e imprevisíveis;
- Manutenção preventiva - para evitar falhas resultantes da degradação progressiva.

Pode-se generalizar e descrever as diferentes formas ou políticas de manutenção na Figura 2.10.

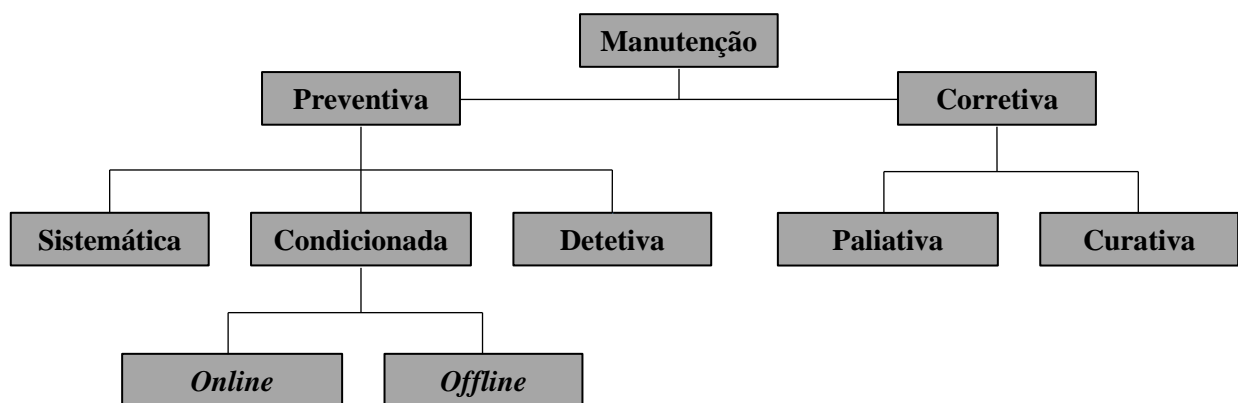


Figura 2.10: Políticas de manutenção, adaptado de Assis (2014).

A um primeiro nível, a manutenção pode ser preventiva (planeada, pró-ativa) e tem como objetivo evitar (prevenir) a falha de um sistema, esta intervenção de manutenção pode ser planeada num momento mais oportuno. Por outro lado a manutenção também pode ser corretiva (MC), não planeada ou reativa e tem como objetivo repor as condições normais de funcionamento de um sistema, se a falha ocorre subitamente poderá haver a necessidade de se intervir de emergência.

A um segundo nível, a manutenção preventiva divide-se em sistemática (MPS), condicionada (MPC) e detetiva (MPD). As MPS desencadeiam-se periodicamente (ou após um componente atingir um determinado limite de idade), com base no conhecimento da lei de degradação aplicável a cada caso e do risco aceite de falha. As MPC desencadeiam-se no fim de vida útil dos componentes, momento que é possível prever observando a tendência das variáveis que refletem a sua degradação através de controlo de condição (vibrometria, ultrassons, densidade de partículas de óleo, etc.). As ações detetivas procuram detetar falhas ocultas, isto é, componentes que já se encontram falhados, mas que não denunciam tal condição. As falhas ocultas só se revelam após testes de funcionamento no local ou em laboratório.

Também a um segundo nível, a MC divide-se em paliativa e curativa. Quando se dá a avaria, muitas vezes numa primeira abordagem, a intervenção é paliativa e não resolve a(s) causa(s) que lhe deu origem, enquanto a intervenção curativa procura a(s) causa(s) da avaria e elimina-a(s) (Assis, 2014).

Se o tipo de manutenção implementada numa organização for essencialmente corretiva, em que a ação de manutenção intervém apenas após a ocorrência de uma falha, normalmente em função da intervenção verificam-se custos elevados associados à paragem de produção – designados Custos de Oportunidade (CO), com o intuito de repor o normal funcionamento do equipamento.

O custo de perda de produção depende da duração do intervalo de tempo durante o qual o serviço deixa de ser assegurado por falta de equipamentos disponíveis e da importância do equipamento no ciclo produtivo (Silva, 2016), conforme Figura 2.11.

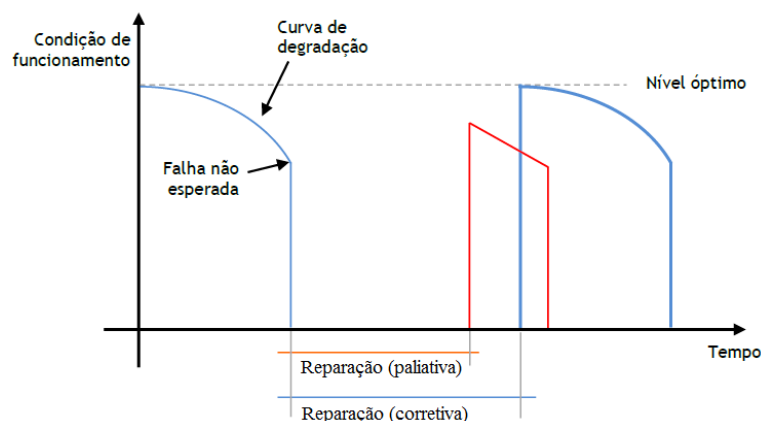


Figura 2.11: Ação de manutenção após surgir a falha, adaptado de Silva (2016).

A um terceiro nível, a monitorização da degradação de componentes (do sistema), quando é vigiada ao longo do tempo por um sensor, isto é *online*, atua perante a eminência de uma falha, desde que não falhe também. Quando não é tecnicamente possível ou economicamente viável, terá que se realizar uma monitorização intermitente ou *offline* com base em inspeções. Os momentos de inspeção

devem ser bem selecionados, com base na natureza do MDF que se procura acautelar. Quando a função que descreve a progressão da degradação de um parâmetro crítico ao longo do tempo (espessura mínima de uma chapa, espessura máxima de uma incrustação, por exemplo), o momento de intervenção pode ser previsto com alguma confiança; este modo de atuação é conhecido por manutenção preditiva.

Todas as intervenções podem ser individuais quando se intervém corretiva ou preventivamente num único componente, ou grupada (ou de oportunidade) quando se aproveita a oportunidade da paragem para substituir ou reparar um ou outros mais componentes (Assis, 2014).

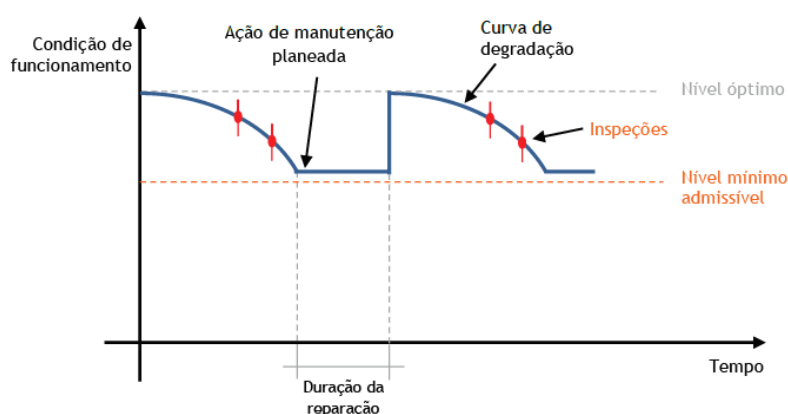


Figura 2.12: Ação de MPC, com inspeções periódicas (Silva, 2016).

Conforme representado na Figura 2.12, a realização de inspeções periódicas aos equipamentos – *offline*, ou a monitorização contínua dos equipamentos – *online*, permite evitar a ocorrência de falhas. Como resultado da substituição de componentes que são alvo de verificações regulares do seu estado de funcionamento, verifica-se que a taxa de falhas diminui (Silva, 2016).

Tais inspeções devem ser realizadas tendo em conta a chamada curva $P-F$, ou seja, que tenha em conta o momento em que se verifica o início de uma falha (falha potencial) e o momento em que esta se manifesta com todas as consequências (falha funcional). Este intervalo é designado por período $P-F$ (Potencial - Funcional), período de alerta ou prazo de falha (*lead time to failure*) conforme se ilustra na Figura 2.13. O intervalo $P-F$ é aleatório sendo descrito por uma distribuição de probabilidade entre os extremos $P-F'$ e $P-F''$ (Assis, 2014).

O ponto M representa o momento mais tardio em que a falha deve ser detetada de forma a garantir tempo suficiente para providenciar e evitar a sua transformação em falha funcional (ponto F) ou, pelo menos, evitar (ou minimizar) as suas consequências (Assis, 2014).

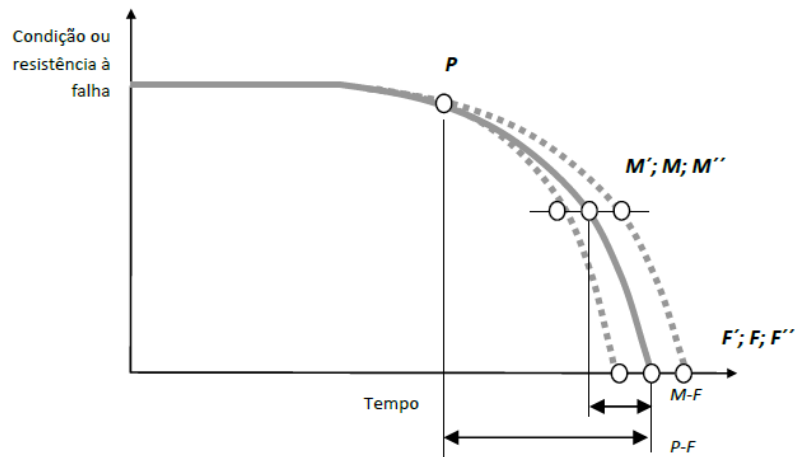


Figura 2.13: Intervalos dos períodos $P-F$ e $M-F$ (Assis, 2014).

2.3. Conceito de Fiabilidade

Prever o futuro sempre foi uma das vontades do homem, a muitas vezes fazendo-o através da observação de determinados acontecimentos e comportamentos e daí tentando adivinhar o que poderia acontecer. Questões como: “Durante quanto tempo o equipamento é capaz de funcionar sem falhar?” ou “Qual é o momento adequado para fazer a substituição de determinado componente, antes que o mesmo falhe?” são exemplos aos quais o estudo da fiabilidade tenta responder, utilizando para isso ferramentas matemáticas, designadas por modelos estatísticos (Sobral, 2010).

Obviamente que, quanto maior for a fiabilidade desejada, maiores serão os custos envolvidos. Surge então a necessidade de se adaptar os requisitos da fiabilidade ao sistema em causa. Por exemplo, num carro de competição, os requisitos de fiabilidade serão com certeza secundarizados face a um avião comercial ou um equipamento hospitalar (Assis, 2014).

A norma NP EN 13306 (2007) define a Fiabilidade como a “*A aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.*” Nesta frase, o termo Fiabilidade pode também ser definido como uma probabilidade.

Na Figura 2.14 representa-se graficamente uma função de probabilidade instantânea de falha (ou PDF de falha):

- $F(t)$ representa a probabilidade de um componente falhar até ao momento t (área riscada)
- $R(t)$ representa a probabilidade de o órgão sobreviver sem falhas até ao momento t (área em branco)

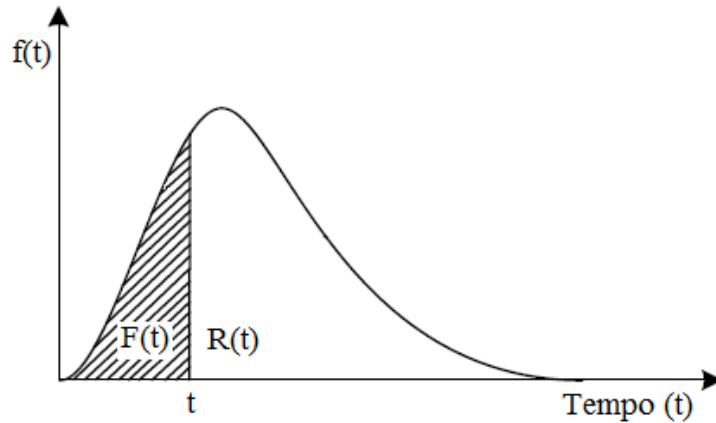


Figura 2.14: Representação gráfica de uma PDF de falha

Se a função $f(t)$ for integrada nos intervalos de área riscada e área em branco tem-se respectivamente:

$$F(t) = \int_0^t f(t).dt ; R(t) = \int_t^{\infty} f(t).dt \quad (2.1)$$

Verifica-se portanto complementaridade entre $R(t)$ e $F(t)$ na Figura 2.14:

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (2.2)$$

No ponto 4.2.1 as Expressões 2.1 e 2.2 serão aplicadas à função de *Weibull* e no Capítulo 6 serão usadas no caso de estudo.

2.3.1. Fiabilidade Intrínseca e Extrínseca

Os fabricantes determinam a fiabilidade de um componente a partir de ensaios normalizados, o que diferencia muitas vezes nas aplicações reais que irão estar sujeitos. Esta fiabilidade denomina-se de fiabilidade intrínseca, pois a mesma é a obtida à saída da fábrica e resulta da qualidade do projeto.

Por outro lado, os utilizadores podem determinar a fiabilidade de um componente a partir da experiência da sua utilização *in situ*. Esta fiabilidade identifica-se como uma fiabilidade extrínseca porque é obtida em demonstrações reais de funcionamento (Assis, 2014).

2.3.2. Fiabilidade Humana

Segundo Assis (2014) a fiabilidade de um sistema de produção, cuja colaboração do Homem é necessária, designam-se de sistemas sociotécnicos e essa fiabilidade será resultante da interatividade Homem-máquina. O erro humano pode ser definido como a falha de um objetivo proposto ou um desvio em relação a uma norma. Estes podem ocorrer devido à incapacidade de tratamento, a nível cognitivo da informação necessária para não errar. Em resultado da falta de informação, excesso de informação ou perturbação (interferências) da informação.

Os erros humanos também podem ser agrupados em cinco categorias, nomeadamente:

1. Erro de omissão – não executar a operação que estava inicialmente programada
2. Erro de execução – executar a tarefa, mas não da forma prevista
3. Erro de derivação – introdução de uma ação não prevista
4. Erro de sequência – a operação é executada, mas não no momento que devia ser
5. Erro de atraso – a tarefa é executada, mas tardiamente

Para Sobral (2010) a fiabilidade humana pode ser avaliada em duas fases: a fase de aprendizagem (taxa de erros decrescente) e a fase de execução (erros aleatórios) e para Assis (2014) pode ser quantificada em termos de frequência por:

- Número de erros cometidos em n solicitações
- Número de erros cometidos no período de observação p

Existem várias metodologias sobre esta temática, destacam-se as técnicas THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) e SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach). Consequentemente o estudo destas metodologias nesta área de fiabilidade humana, não fazem parte dos objetivos da presente dissertação, pretendendo-se apenas fazer referência a este assunto, muitas vezes de vital importância na gestão do risco (Sobral, 2010).

2.3.3. Fiabilidade Condicional (ou de Missão)

Torna-se por vezes necessário saber a fiabilidade de um componente para uma determinada missão de duração Δt após o componente em causa ter acumulado uma duração de vida T . Trata-se da denominada fiabilidade condicional (ou fiabilidade de missão), que pode ser expressa da seguinte forma:

$$R(\Delta t|T) = \frac{R(T + \Delta t)}{R(T)} \quad (2.3)$$

Ou complementarmente como a Expressão 2.2:

$$F(\Delta t|T) = 1 - \frac{R(T + \Delta t)}{R(T)} = \frac{F(T + \Delta t) - F(T)}{1 - F(T)} \quad (2.4)$$

O significado de uma probabilidade condicionada pode ser melhor compreendida se se atender ao gráfico da Figura 2.15. Pode-se observar a zona a preto que representa a probabilidade de o componente falhar até ao tempo T , representada por $F(T)$. Porém, se este componente sobreviveu até este momento T , a probabilidade de ele falhar durante a missão Δt é representada pela zona a verde. Em relação à zona a azul, esta representa o complementar da zona a preto e trata-se da fiabilidade ($1 - F(T)$) no momento T .

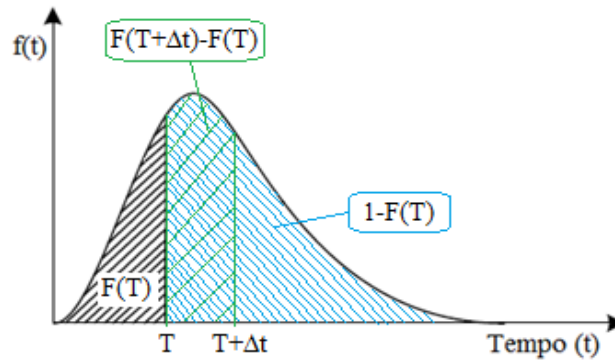


Figura 2.15: Probabilidade condicionada de falha durante a missão Δt tendo sobrevivido até T .

Uma propriedade interessante da fiabilidade de um componente, durante o seu período de vida útil, é este apresentar sempre a mesma probabilidade de sucesso para uma determinada missão, independentemente do tempo em serviço já acumulado.

Sabendo que em vida útil a fiabilidade é calculada pela Expressão:

$$R(T) = e^{-\lambda T} \quad (2.5)$$

E substituindo na Expressão 2.3, obtém-se:

$$R(\Delta t|T) = \frac{R(T + \Delta t)}{R(T)} = \frac{e^{-\lambda(T+\Delta t)}}{e^{-\lambda T}} = e^{-\lambda \Delta t} \quad (2.6)$$

O resultado é independente de T o que comprova o atrás dito. Por outras palavras, no período de vida útil o componente parte para cada missão sempre tão bom como se fosse novo, independentemente da idade do componente (Assis, 2014).

2.3.4. Fiabilidade de Componentes

Quando não se possui uma base de dados fidedigna relativamente à fiabilidade de um componente, ou outra informação que nos permita calcular com relativa facilidade essa mesma fiabilidade, tem-se que recorrer à análise de dados de falha. Torna-se necessário obter esses dados de MDF em contexto operacional (durante a exploração) ou através de ensaios (Sobral, 2010).

Porém, a tarefa de análise dos dados dos MDF pode não ser simples e quando mal conduzida, pode levar a resultados errados, no ponto 4.1 descrevem-se os quatro passos fundamentais para se obterem resultados satisfatórios na estimação dos parâmetros característicos da distribuição que descreve o comportamento do componente à falha. Conforme indicado em 4.2.1, após conhecimento da função densidade de probabilidade (PDF) pode-se determinar outras, como a fiabilidade, a probabilidade de falha ou a função de risco.

Modos de Falha Concorrentes ou Competitivos

Quando um componente falha devido a mais de um MDF, será adequada a prática corrente de seleccionar o MDF predominante, ou seja o menor tempo médio entre falhas (MTTF) para basear o cálculo da periodicidade de substituição preventiva do componente?

A fiabilidade de um componente que falha devido a mais de um MDF deverá ser calculada considerando os MDF em série?

Segundo Assis & Ribeiro (2018), os modelos analíticos que descrevem estes comportamentos podem por vezes ser complexos. Substituindo-os por métodos de simulação em computador, usando a técnica de simulação de Monte-Carlo, facilmente implementável em EXCEL, torna-se possível obter os tempos até à falha (TTF) resultantes dos MDFC e através de uma análise de sensibilidade, obter a solução ótima económica de substituição preventiva. Também a partir desses dados, pode-se extrair a função PDF resultante e assim perceber o comportamento em falha dos MDFC. Para o efeito, foi desenvolvida para esta dissertação uma programação em EXCEL por forma a simular o comportamento dos MDFC.

Esta técnica torna necessária a obtenção de valores de TTF dos MDFC com base nos parâmetros que definem a função de *Weibull* de cada um MDF.

Estes TTF podem ser facilmente obtidos pela expressão que corresponde ao momento t em que se terá atingido uma certa probabilidade acumulada de falha $F(t)$. Através da substituição de $F(t)$ pela

função do EXCEL **ALEATÓRIO()** ou **RAND()** serão simulados aleatoriamente números compreendidos entre zero e um, obtendo-se pela Expressão 2.7 os TTF.

$$t = t_0 + \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} = t_0 + \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \text{Aleatório}()} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.7)$$

Assim, em cada corrida do simulador o menor dos TTF anuncia o MDF respectivo. Esta temática encontra-se desenvolvida no caso de estudo no ponto 6.4.5.

2.3.5. Fiabilidade de Sistemas

Um sistema é constituído por diversos componentes, os quais podem ser considerados a funcionar em série, paralelo, paralelo *standby*, mistos ou de forma indefinida ou complexa (cruzados).

Um sistema série só falha se apenas um e só um dos componentes falhar, daí se evidencia a sua baixa fiabilidade.

Um sistema paralelo pode ser ativo ou restrito e só falha se todos os componentes que constituem o sistema falharem ou se a restrição do número de componentes em paralelo operacionais não for cumprida, neste caso está-se perante redundâncias ativas ou passivas (respetivamente) resultando num sistema de fiabilidade aumentada.

No caso do sistema paralelo *standby*, o componente redundante só entra em funcionamento após a falha do componente primário e após a deteção e comutação de um dispositivo denominado detetor-comutador (ou sensor-comutador).

O sistema misto corresponde a um sistema constituídos por componentes que se encontram associados em série e outros associados em paralelo.

Considera-se um sistema complexo quando não é possível repartir o sistema em séries, paralelos, série de paralelos ou paralelo de séries, paralelos restritos ou paralelos *standby* (Sobral, 2010), (Assis, 2014).

Nos pontos 2.3.5.1 e 2.3.5.2 detalham-se conceitos de fiabilidade apenas dos sistemas série e paralelo. Os restantes tipos de sistemas não fazem parte do objetivo deste trabalho, como tal apenas

foram abordados e referidos para conhecimento geral. Face ao exposto não serão aprofundados, aproveitando para referir a existência de diversa literatura que os sustenta.

2.3.5.1. Sistemas Série

Num sistema série, os componentes estão relacionados de tal forma que a avaria de um qualquer componente provoca a falha do sistema. Dito de outra forma, o sucesso do sistema depende do sucesso dos componentes que o compõe. Um sistema série pode ser representado graficamente conforme ilustrado na Figura 2.16.



Figura 2.16: Diagrama lógico de um sistema tipo série

Sabendo a distribuição estatística e a Expressão relativa à fiabilidade de cada componente que compõe o sistema, é possível determinar a fiabilidade do sistema em qualquer instante t , através da Expressão:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \dots R_n(t) \quad (2.8)$$

Se se pretende conhecer a probabilidade de falha do sistema, pode-se facilmente saber através da complementar probabilidade acumulada de falha:

$$F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (R_i)(t) \quad (2.9)$$

2.3.5.2. Sistemas Paralelo

Num sistema paralelo ativo, só ocorre a falha do sistema quando todos os seus componentes avariarem. Também dito de outra forma, pode-se afirmar que um sistema com componentes exclusivamente em paralelo terá sucesso enquanto pelo menos um dos seus componentes o tiver. Um sistema paralelo poderá ser representado conforme Figura 2.17.

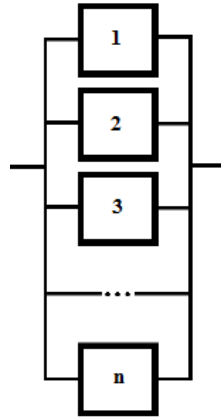


Figura 2.17: Diagrama lógico de um sistema tipo paralelo (ativo total)

Para um sistema paralelo ativo, a fiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - [F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot F_3(t) \dots F_n(t)] \quad (2.10)$$

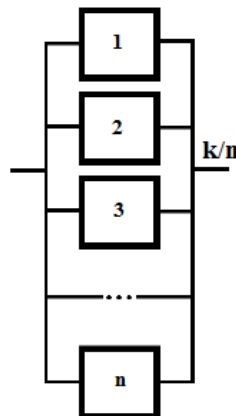


Figura 2.18: Diagrama lógico de um sistema tipo Paralelo Restrito (k/n)

No entanto, existem sistemas paralelos que se referem a situações em que dos “n” componentes que se encontram em paralelo são necessários que pelo menos “k” componentes ($k < n$) a funcionar, isto para que o sistema funcione. A Figura 2.18 traduz a representação gráfica deste tipo de sistemas, designados por sistema paralelo restrito ou sistemas paralelo k em n .

Para sistemas deste tipo paralelo restrito (k/n), com componentes estatisticamente independentes e no caso de serem todos iguais (situação mais comum na utilização de redundâncias), a fiabilidade do sistema pode ser determinada através do binómio de Newton. Para um exemplo de três componentes idênticos instalados em paralelo tem-se os seguintes estados possíveis:

$$(R + F)^3 = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + (F_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot F_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 \cdot F_3) + (F_1 \cdot F_2 \cdot R_3 + F_1 \cdot R_2 \cdot F_3 + R_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 = 1 \quad (2.11)$$

Ou

$$(R + F)^3 = R^3 + 3R^2F + 3RF^2 + F^3 \quad (2.12)$$

Assim, a fiabilidade de um sistema paralelo restrito onde seja necessário o funcionamento de no mínimo dois dos três componentes ($k = 2$ e $n = 3$) pode ser determinada da seguinte Expressão 2.13:

$$R_s(t) = R^3(t) + 3R^2(t)F(t) \quad (2.13)$$

2.4. Conceito de Manutibilidade

Segundo a Norma NP EN 13306 (2007), a manutibilidade é definida como a “*aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos*”, onde o termo Manutibilidade poderá também ser definido como uma probabilidade.

Para Assis (2014) a definição de manutibilidade também pode ser expressa como uma medida de tempo T necessário para reparar ou substituir uma certa percentagem de componentes falhados ou como uma probabilidade P de reparar ou substituir um componente num certo intervalo de tempo T .

Matematicamente traduz-se no número de reparações N (ou intervenções corretivas) realizadas durante um certo intervalo de tempo – tempo de reparação (TTR), e, calcula-se o seu tempo médio (MTTR) pela Expressão 2.14:

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{1}^N TTR \quad (2.14)$$

Desta forma, Assis (2014) e Sobral (2010) relacionam a manutibilidade com a fase de projeto do equipamento e com a atenção que nessa fase foi dada a aspetos como:

- Boa acessibilidade;
- Facilidade de diagnóstico e de acesso aos locais de inspeção;
- Facilidade de (des)montagem dos componentes sem ferramentas especiais;
- Identificação dos circuitos pelas cores convencionais;
- Modularização de funções;
- Outros.

Porém este tempo de manutenção (referente a ações técnicas) também pode ser representado por tempo médio de manutenção corretiva $MTTR_{(MC)}$ ou tempo médio de manutenção preventiva $MTTR_{(MPS)}$ ou ainda, tempo médio (ponderado) de manutenção $MTTR_{(MC+MPS)}$.

$$MTTR_{(MC+MPS)} = \frac{n \cdot MTTR_{(MC)} + m \cdot MTTR_{(MPS)}}{n + m} \quad (2.15)$$

n e m correspondem ao número de intervenções de cada natureza

Quando se fala em reparação há que ter o cuidado em separar, de uma forma clara, o que corresponde às ações técnicas de manutenção e o que é inerente a atrasos administrativos e logísticos (ex.: espera pela chegada de peças sobressalentes).

Segundo Assis (2014), os tempos administrativos e logísticos são considerados no tempo médio de inatividade ou *Mean Down Time* (MDT) de um sistema devido a uma falha. O tempo de inatividade em ações corretivas, é igual à soma do tempo médio $MTTR_{(MC)}$ com os tempos de tratamento administrativo da informação e logística (procura e recolha de ferramentas especiais e de peças de substituição), representado pelo acrónimo ALDT (*Administrative Logistic Delay Time*). Já em ações preventivas, tendo a possibilidade de serem planeadas, o tempo total de inatividade é igual ao tempo de intervenção $MTTR_{(MPS)}$ e não inclui o ALDT, pois estas tarefas são efetuadas com antecedência, dito de outra forma antes do equipamento parar.

$$MDT = MTTR_{(MC+MPS)} + ALDT \quad (2.16)$$

As várias funções usadas em manutibilidade são semelhantes às usadas em fiabilidade e encontram-se deduzidas no ponto 4.2.1. e as PDF podem ser correspondidas da seguinte forma (Assis, 2014):

- Uma Normal, no caso de rotinas de reparação simples, frequentes e de curta duração.
- Uma Exponencial Negativa, no caso de equipamento de complexidade média-alta e falhas pouco frequentes.
- Uma Logarítmica Normal, no caso de equipamentos complexos, muitas operações elementares e falhas pouco frequentes.

Já para Sobral (2010) a distribuição de *Weibull* é de uma forma geral muito prática, uma vez que pode englobar a maioria dos casos práticos, tudo devido à influência do parâmetro de forma α .

A relação entre as funções aplicadas em fiabilidade e manutibilidade são especificadas da seguinte forma (Assis, 2014):

- A PDF de falha $f(t)$ em fiabilidade corresponde à função densidade de reparação $m(t)$ em manutibilidade.
- A função taxa de falhas $h(t)$ em fiabilidade corresponde à taxa de reparação $\mu(t)$ em manutibilidade. A taxa de reparação μ traduz o ritmo ao qual uma certa reparação é realizada e é expressa pelo número de reparações corretamente executadas (tipicamente) em uma hora. A duração média das operações de manutenção MTTR será igual ao inverso daquela taxa ($MTTR = 1/\mu$).
- A função fiabilidade $R(t)$ corresponde à probabilidade de completar com sucesso uma operação de manutenção nesse intervalo $M(t)$

2.5. Conceito de Disponibilidade

De acordo com a norma portuguesa NP EN 13306 (2007), disponibilidade é a “*Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, num dado instante ou durante um dado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos*”, com uma nota mencionando que esta aptidão depende da combinação da fiabilidade, da manutibilidade e da adequabilidade da manutenção.

A disponibilidade também pode ser descrita como uma característica unicamente dos sistemas reparáveis e pode ser interpretada como a “*percentagem de tempo durante o qual um determinado equipamento tendo trabalho para realizar, esteve efetivamente em boas condições de funcionamento*” e também a “*probabilidade de um determinado equipamento se encontrar em boas condições operacionais num qualquer momento futuro*” (Assis, 2014).

Para Sobral (2010) a disponibilidade depende fundamentalmente de:

- Frequência de avarias – Fiabilidade;
- Tempo de reparação das avarias (bens reparáveis) – Manutibilidade;
- Tipo e frequência de intervenções – Estratégia de manutenção;
- Quantidade e qualidade dos meios administrativos e logísticos.

Na Figura 2.19 mostram-se as relações entre a disponibilidade, manutibilidade e fiabilidade para bens reparáveis.

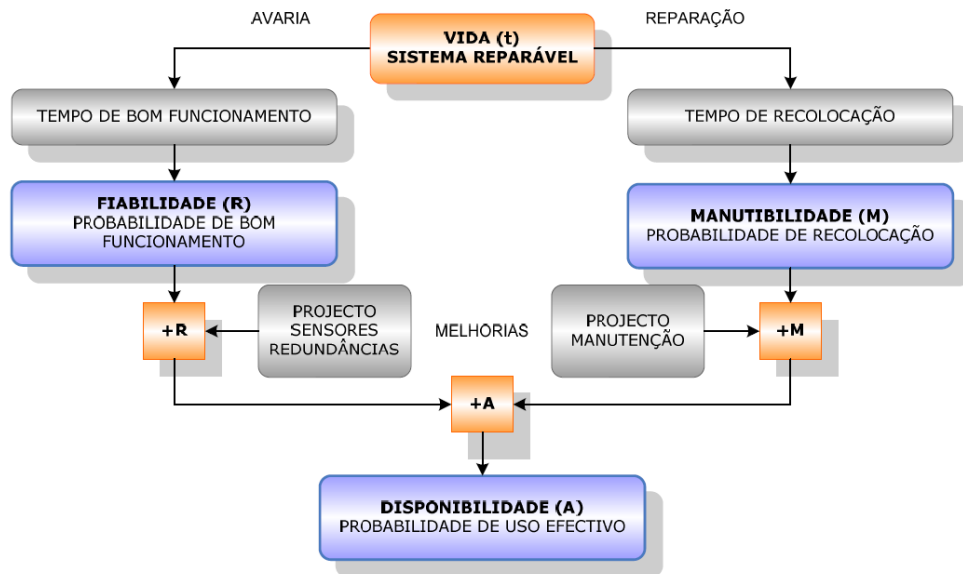


Figura 2.19: Relação entre Disponibilidade, Manutibilidade e Fiabilidade (Sobral, 2010).

De acordo com a representação da Figura 2.19, torna-se evidente perceber que o aumento da disponibilidade é obtido se a fiabilidade e/ou a manutibilidade forem melhoradas. De fato, ao reduzir-se a probabilidade de avaria e/ou ao se diminuïrem os tempos de paragem para intervir no equipamento (preventiva ou corretivamente) o tempo global em que o equipamento se encontra disponível para cumprir a sua função aumentará (Sobral, 2010).

Segundo Assis (2014) a disponibilidade pode ser definida de três modos complementares:

- **Disponibilidade Intrínseca (D_i):** É a probabilidade do sistema cumprir as funções especificadas satisfatoriamente em qualquer momento num ambiente ideal de apoio. Este indicador exclui os tempos com intervenções preventivas e também exclui os tempos relacionados com atividades administrativas e de logística, refletindo assim apenas a fiabilidade do sistema através da Expressão 2.17:

$$D_i = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR_{(MC)}} \quad (2.17)$$

- **Disponibilidade Realizada (D_r):** Este indicador é semelhante ao anterior, mas inclui apenas os tempos de manutenção preventiva. O tempo médio entre intervenções de manutenção ou *Mean Time To Maintenance* (MTTM), independente se terem sido corretivas ou preventivas é dado pela Expressão 2.18:

$$MTTM_{(MC+MPS)} = MTTM = \frac{\text{Tempo de funcionamento acumulado no período } T}{N^{\circ} \text{ de intervenções realizadas (corret. e prev.)}} \quad (2.18)$$

Ficando assim definido D_r pela seguinte Expressão 2.19:

$$D_r = \frac{MTTM}{MTTM + MTTR_{(MC+MPS)}} \quad (2.19)$$

Note-se que $MTTM_{(MC)}$ é o tempo médio entre intervenções de MC e $MTTM_{(MPS)}$ é o período de tempo definido para MPS.

- **Disponibilidade Operacional (D_o):** Este indicador reflete para além da manutibilidade do sistema, a eficiência da organização pois para além dos tempos de intervenções corretivas e preventivas, considera também o tempo com atividades administrativas e de logística:

$$D_o = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (2.20)$$

Sendo o tempo médio de bom funcionamento entre intervenções de manutenção (umas corretivas e outras preventivas), representado por *Mean Up Time* (MUT) e o tempo médio total de inatividade MDT (especificado no ponto 2.4).

3. Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM)

Este capítulo descreve a história, conceitos e princípios de Manutenção Centrada na Fiabilidade. Identifica o processo, decompondo-o numa ferramenta de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos, do inglês *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) e diagrama de decisão RCM para seleção da política de manutenção adequada, seus benefícios e impactos no LCC dos ativos físicos. Identificam-se diversos setores industriais, incluindo a indústria do *healthcare* que beneficiaram em eficácia e eficiência com a implementação desta metodologia. Existem no entanto diversas filosofias, metodologias e ferramentas de análise que podem ser devidamente selecionadas para os sistemas e fins a que se destinam.

Seguidamente exemplificam-se algumas, dando apenas uma visão global sobre a temática.

Uma filosofia muito utilizada é a *Total Productive Maintenance* (TPM), foi desenvolvida na indústria Japonesa a partir dos anos 70 com o principal objetivo de envolver os operadores fabris nas atividades de manutenção, de forma a responsabilizá-los pelo desempenho dos seus equipamentos (Pinto, 2013).

Também a metodologia *Lean Centered Maintenance* (LCM) emprega atividades de manutenção planeada através das práticas da TPM, no entanto utiliza estratégias de manutenção centrada na fiabilidade (RCM), recorrendo a equipas autónomas e *multitasking*, através do uso correto de sistemas informáticos de apoio à manutenção (Pinto, 2013).

Uma outra metodologia, cujo acrónimo RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*) integra as características de fiabilidade, manutibilidade, disponibilidade e segurança de um bem, visa a redução dos custos e ao mesmo tempo a diminuição dos riscos (Sobral, 2010).

Diversas técnicas podem ser usadas em análises de risco, com o objetivo de evitar ou diminuir a probabilidade de ocorrência de acontecimentos indesejáveis e/ou reduzir ou mitigar a severidade dos efeitos das suas consequências. No entanto, estes objetivos só serão possíveis com a aplicação das técnicas mais apropriadas, destacando-se algumas metodologias de análise como *Hazard and Operability* (HAZOP), *Root Cause Analysis* (RCA), *Fault Tree Analysis* (FTA), *Event Tree Analysis* (ETA), *Vulnerability Analysis* (VA) ou *Safety Barrier Analysis* (SBA), entre outras (Sobral, 2019).

3.1. História da Metodologia RCM

Uma investigação pioneira, conduzida por *Nowlan e Heap* da *United Airlines* culminou numa publicação em 1978 intitulada de “*Reliability Centered Maintenance*” (RCM). Tal investigação teve como objetivo monitorizar as falhas de várias centenas de componentes mecânicos, elétricos e estruturais dos aviões, tendo sido concluído que à medida que os componentes envelheciam identificavam-se com um determinado padrão de falha (Dunn, 2003). Revelou-se a existência de seis padrões de risco de falha, isto é, a probabilidade condicionada de falha de um componente em função do tempo de vida acumulada (funcionamento), conforme se caracterizam na Figura 3.1.

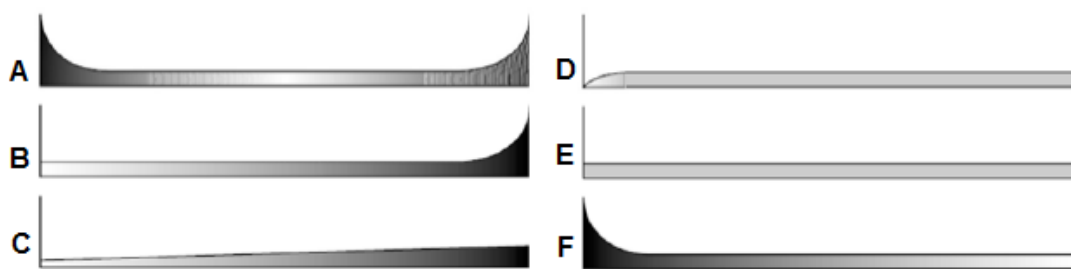


Figura 3.1: Seis padrões de falha, adaptado de Moubray (1997).

O **padrão A** é conhecido como a curva da banheira. Inicia-se com uma elevada probabilidade de falhas, conhecida como mortalidade infantil, seguidamente entra numa zona com taxa de falhas aproximadamente constante ou de aumento gradual da probabilidade de falha, terminando na zona de desgaste ou envelhecimento devido ao respetivo aumento da probabilidade de falha.

O **padrão B** representa-se como um período constante ou de aumento gradual da probabilidade de falhas, terminando na zona de desgaste ou envelhecimento devido ao respetivo aumento da probabilidade de falha.

No **padrão C** a probabilidade de falhas cresce lentamente e não se identifica nenhuma zona de desgaste ou envelhecimento.

O **padrão D** caracteriza-se por uma baixa probabilidade de falhas inicial, seguidamente verifica-se um aumento, isto é, cresce até a probabilidade de falha ficar constante.

O **padrão E** caracteriza-se por uma probabilidade de falha constante durante toda a vida, isto é, as falhas são aleatórias ao longo do tempo.

O **padrão F** começa com uma alta mortalidade infantil, posteriormente diminui e estabiliza numa zona constante ou de aumento gradual da probabilidade de falha (Moubray, 1997).

Percebeu-se efetivamente a existência de uma proporcionalidade entre as falhas dos tipos de componentes e os seis padrões de falha. Neste estudo, os diferentes padrões de falha tiveram as seguintes proporções tal como representado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Proporcionalidade entre padrões e probabilidades condicionais de falha, adaptado de Dunn (2003).

Padrão de Falha	Probabilidade Condicional de Falha
A	4%
B	2%
C	5%
D	7%
E	14%
F	68%

Até à realização daquele estudo, supunha-se que a proporção de falhas infantis eram muito menores e que as falhas casuais eram muito maiores, este estudo ficou famoso pelos surpreendentes resultados, verificou-se que os mesmos põem em evidência a adequabilidade crescente da manutenção com base na condição do estado do órgão (ou componente), em comparação com a MPS baseada na vida acumulada, já que esta era “cega” e não permite evitar as falhas infantis, nem tão pouco as casuais (Assis, 2014).

Primeiro porque é de fato importante analisar que de acordo com os gráficos dos seis padrões de probabilidade condicional de falha, mais de 50% das falhas acontecem no início da vida dos componentes. Isso significava que, sempre que se substituía ou reparava um componente, haveria mais de 50% de probabilidade que a falha acontecesse na fase de mortalidade infantil. Noutro estudo, conduzido pelo Instituto de Operações de Energia Nuclear nos Estados Unidos da América e pelo Instituto Central de Pesquisa do Setor Elétrico no Japão, também se concluiu que mais de metade dos problemas de funcionamento das centrais nucleares estavam associados a manutenção, testes e atividades de calibração. A profunda mudança estava na eminência de acontecer, verificava-se que muitas das tarefas realizadas sob políticas de manutenção tradicionais não beneficiavam em nada a fiabilidade e disponibilidade dos ativos (padrão de falha E), sendo mesmo contraproducentes, especialmente porque podia-se aumentar a probabilidade condicional de falha no período de mortalidade infantil (padrão de falha F) (Dunn, 2003).

Com a implementação do modelo de manutenção segundo a metodologia RCM, torna-se possível manter as condições operacionais dos ativos físicos (eficácia), ao menor custo económico possível (eficiência) (Assis, 2014).

3.2. Princípios da metodologia RCM

Na manutenção tradicional o enfoque está na prevenção de falhas do equipamento, os princípios do RCM focam-se nas funções do equipamento e na prevenção das consequências das falhas, conforme descrito a seguir por Assis (2014):

1. Orientados para a funcionalidade do sistema. Procura preservar a função do sistema ou do equipamento, não apenas a operabilidade de componentes.
2. Focados no sistema, priorizando-se face às funções dos componentes (Lower Replacement Unit - LRU).
3. Centrados na fiabilidade. Trata os dados estatísticos de falhas para se conhecer a probabilidade condicional de falhas do equipamento.
4. Possibilita a comparação com a fiabilidade de projeto. Com o conhecimento da fiabilidade extrínseca, torna-se possível compará-la com a fiabilidade intrínseca.
5. Direcionados para a segurança e economia. A segurança deve ser assegurada a qualquer custo e é prioritária, mesmo que implique alteração do projeto.
6. Orientados para tratamento de qualquer situação insatisfatória, ou seja, uma falha não é opção. Considera-se como falha a perda de função de um equipamento ou, de não conformidade do produto ou processo.
7. Resultados tangíveis. Deverá conseguir-se reduzir o número de falhas, ou pelo menos reduzir os danos devidos a elas, mitigar as consequências.
8. Baseados nas políticas de manutenção, nesta dissertação consideram-se políticas definidas por Assis (2014) e encontram-se na Figura 2.10.
9. Processo de implementação com *feedback loop*, é uma das mais importantes características desta metodologia RCM pois permite ter revisões constantes. Ao reunirem-se novos dados de falhas, após uma análise cuidada, possibilita novos ajustes e adaptações, tornando-se uma metodologia dinâmica, melhora e adapta assim os procedimentos e políticas de manutenção futuras do sistema.

3.3. O processo da metodologia RCM

A metodologia RCM, quando adequadamente conduzida consiste em encontrar resposta para sete questões aplicadas a cada LRU, equipamento ou sistema. Sendo elas as seguintes (Assis, 2014):

1. Quais as funções do equipamento (capacidade, qualidade, nível de serviço, ambiente, custos e segurança) e os níveis (ou *standards*) de desempenho requeridos (*functions*)?
2. De que maneiras podem estas funções falhar (*functional failures*)?
3. O que causa cada falha de função (*failure modes*)?
4. O que acontece quando uma falha ocorre (*failure effects*)?
5. Qual a importância das consequências de cada falha (*failure consequences*)?
6. O que pode ser feito para evitar cada falha?
7. O que fazer quando não é possível ou justificável uma política de manutenção preventiva?

As ferramentas a utilizar para desempenhar o processo da metodologia RCM são:

- FMEA – Esta ferramenta responde às questões 1 a 5 e encontra-se em forma de Tabela na Figura 3.2.
- Diagrama de Decisão da metodologia RCM – Este diagrama responde às questões 6 e 7 e estão esquematizadas em forma de fluxograma nas Figuras 3.3 e 3.4.

FMEA nº:								
Data:								
Equipamento:					Código Equipamento:			
Sistema:					Código do Sistema:			
Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade

Figura 3.2: Tabela de análise FMEA (Assis, 2014).

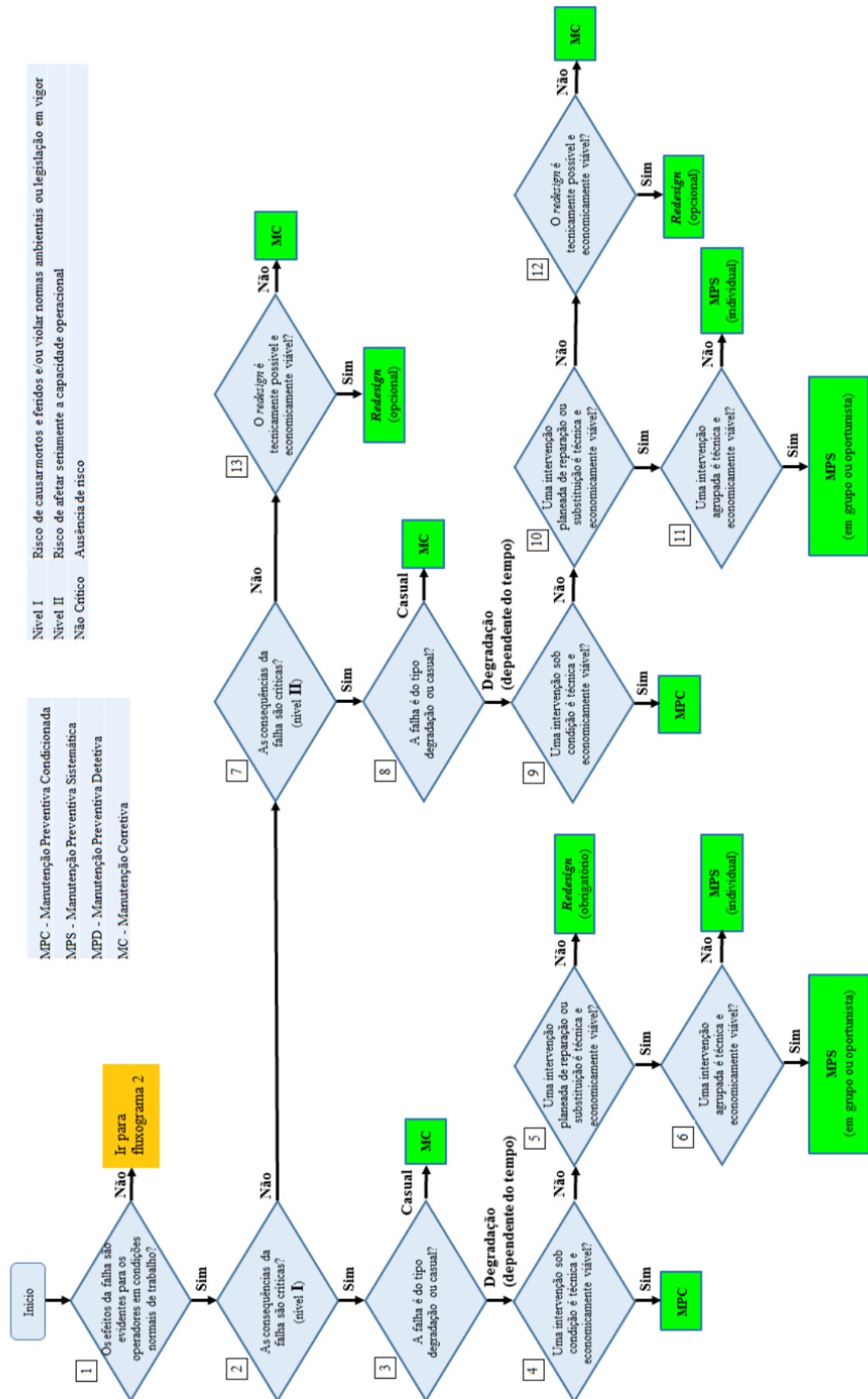


Figura 3.3: Diagrama de decisão de RCM (fluxograma 1), adaptado de Assis (2014).

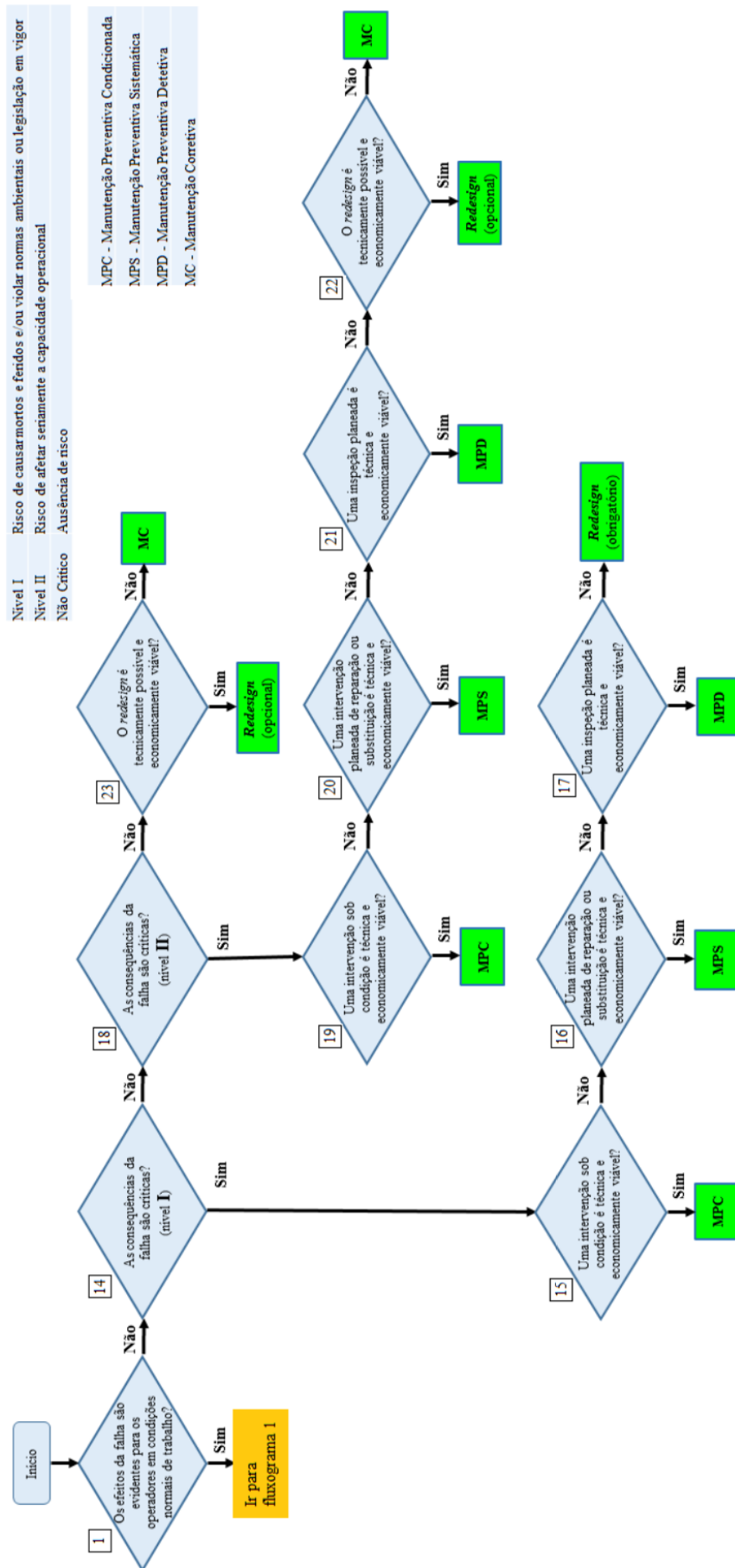


Figura 3.4: Diagrama de decisão de RCM (fluxograma 2), adaptado de Assis (2014).

3.4. Benefícios da implementação da metodologia RCM

Com a implementação da metodologia RCM, diversas organizações de várias áreas industriais, onde também se inserem as UCS, geram-se benefícios devidamente identificados em diversos fatores, aumentando a sua competitividade e visão no mercado em que se inserem. Destacando-se os seguintes:

Fiabilidade: A melhoria da fiabilidade surge como objetivo principal, através da constante reavaliação das políticas de manutenção, informações resultantes no *feedback* que a equipa de técnicos, gestores de manutenção, supervisores, construtores e representantes dos equipamentos transmitem para a formação e aumento de uma base de dados.

Custos: Inicialmente os custos são elevados, devido à aquisição de equipamentos para monitorização das condições de funcionamento (monitorização), no entanto esta fase é breve. A seu tempo, as MPS e as MC serão substituídas por MPC, resultando numa diminuição de custos.

Calendarização: A monitorização das condições de funcionamento dos equipamentos possibilita antecipadamente, organizar diversos aspetos importantes de planeamento, adquirir peças sobressalentes, preparar e adequar a equipa de manutenção técnica, informar antecipadamente a paragem do sistema, com o objetivo de realizar a intervenção de manutenção eficientemente e com o menor impacto.

Equipamento / Substituição de componentes: Uma grande vantagem da metodologia RCM é que os equipamentos / componentes têm um uso maximizado, a sua substituição é considerada conforme a condição de funcionamento (função) dos mesmos e não com base em calendarizações.

Eficiência / Produtividade: Segurança é a primeira preocupação desta metodologia, a segunda é o custo/eficácia (isto é, eficiência). A eficiência tem primeiramente como base a análise de criticidade, posteriormente avaliar-se-á o custo respetivo. A metodologia RCM é flexível e permite adequar e ajustar as políticas de manutenção quando necessário, pois a manutenção que não é eficiente é identificada.

3.5. O impacto da metodologia RCM no custo do ciclo de vida dos ativos físicos

A metodologia RCM deve ser considerada ao longo do ciclo de vida de ativos físicos, por forma a adquirir a máxima eficiência. As quatro maiores fases do ciclo de vida dos ativos físicos são:

1. Planeamento
2. Projeto
3. Construção
4. Operação e manutenção

Na Figura 3.5 percebe-se que na primeira fase, a de definições e planeamento corresponde aproximadamente a dois terços do LCC dos ativos. A segunda e terceira fase corresponde ao projeto e construção respetivamente, em conjunto equivalem aproximadamente a 30%. O restante corresponde à fase de exploração dos ativos (aproximadamente 5%), isto é, operação e manutenção.

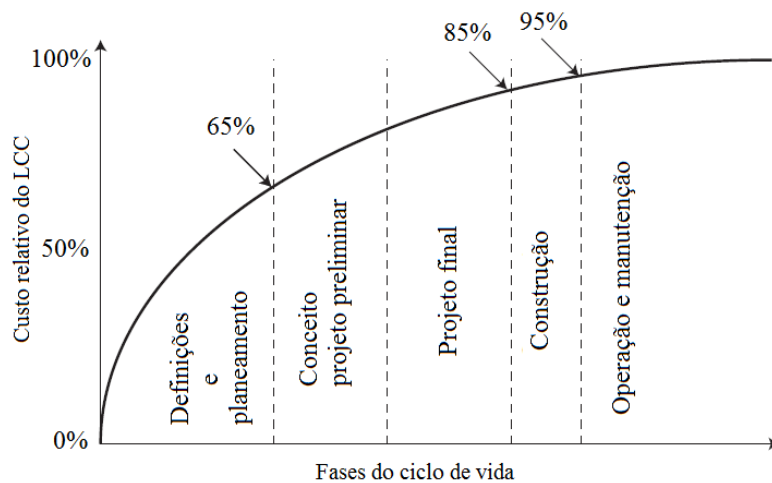


Figura 3.5: As quatro fases do LCC, adaptado de Rausand (2004).

Embora a operação e manutenção tenham uma parcela relativamente pequena no LCC, a aplicação da metodologia RCM ainda é capaz de obter poupanças de 30 a 50% no orçamento anual de manutenção de uma instalação, redução essa que pode ser importante para a prestação de resultados de um gestor de ativos e apreciada pelas suas organizações (Chalifoux & Baird, 1999).

3.6. Áreas de aplicação da metodologia RCM

Embora o setor da aviação civil tivesse sido pioneiro na implementação desta metodologia, contribuindo com a obtenção de benefícios económicos e fiabilísticos, no final do século XX praticamente todas as indústrias de alta fiabilidade dos Estados Unidos da América, incluindo a NASA, as forças armadas, a indústria aeroespacial, a indústria de submarinos nucleares, a indústria petrolífera e a indústria de energia nuclear, entre outras, iniciaram a sua aplicação, tornando-se bastante eficazes e altamente eficientes (Ridgway et al., 2016). Diversos estudos foram desenvolvidos na área industrial.

Por exemplo numa central termoelétrica de ciclo combinado no Irão, criou-se uma estrutura baseada no risco para avaliação da criticidade, tendo-se seguido a aplicação da metodologia RCM, conduzindo a políticas de manutenção mais eficientes (Sabouhi et al., 2016).

Noutro exemplo na China, na área industrial de exploração de petróleo e gás, face aos enormes custos de manutenção e taxas de falhas exorbitantes nos ativos de perfuração e exploração, aplicou-se a metodologia RCM. Com base na importância dos equipamentos criou-se uma estrutura de prioridades, para decidir quais as políticas de manutenção a implementar nos diversos ativos (Tang et al., 2015).

Também em circuitos ferroviários urbanos *Maglev*, na China, constata-se a aplicabilidade da estratégia baseada na metodologia RCM para otimizar a manutenção e diminuir os custos associados (Dou et al., 2014).

Num outro trabalho desenvolvido para a indústria petroquímica na Tailândia, propôs-se a aplicação da metodologia RCM tendo-se obtido tanto melhorias significativas no tempo médio entre falhas (fiabilidade), como na diminuição dos custos associados e uma menor ocupação das equipas de manutenção (Umpawanwong & Chutima, 2015).

Numa linha de enchimento de óleos lubrificantes na Indonésia, aplicou-se a metodologia RCM numa máquina com tecnologia laser, com o objetivo de se identificar componentes críticos, definir políticas de manutenção adequadas e intervalos de tempo entre inspeções, que foram as premissas para se adaptarem periodicidades ótimas económicas de manutenção preventiva (Suryono & Rosyidi, 2018).

Atualmente o setor do *healthcare* é considerado como parte integrante da alta fiabilidade, no entanto ainda não se verificaram grandes mudanças, segundo os autores Ridgway et al., (2016) é dececionante constatar que este setor será certamente o último a adotar os métodos científicos da metodologia RCM.

3.6.1. Instalações hospitalares

O estado de degradação das instalações técnicas dos edifícios afetam diversos setores, as UCS não são exceção. Estas unidades dispõem de instalações com uma arquitetura específica e única, comparativamente a outras instalações. Para além da complexidade dos sistemas, a análise de criticidade tem extrema importância e jamais poderá ser desprezada, face à importância que estes sistemas têm na

prestação de serviços (cuidados de saúde) aos utentes. Em ambiente hospital, foi realizado um estudo onde se implementou a metodologia RCM em quatro sistemas, nomeadamente:

- Sistema primário de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC);
- Sistema secundário de AVAC;
- Sistema de elevadores;
- Sistema de gases medicinais.

Esta implementação permitiu concluir e determinar intervalos de manutenção ótimos para os componentes destes sistemas, considerando indicadores importantíssimos, como o *down time* e os respetivos custos de manutenção. Na metodologia RCM aplicada, verificaram-se poupanças entre 6% e 16%, comparativamente às estratégias de manutenção antes utilizadas (Salah et al., 2018).

As UCS também são alvo de avaliações nos serviços prestados aos utentes, com objetivos de obterem melhorias no que concerne à qualidade dessa prestação de serviços de saúde, estudos de análises de risco são efetuados com o objetivo de melhorar a sua qualidade.

Por exemplo, no serviço de Radioterapia e Oncologia de um hospital em Espanha foi efetuado um estudo com base na ferramenta FMEA. Esta análise possibilitou identificar nesse serviço cinquenta e sete MDF associados a falhas individuais dos técnicos de saúde (técnicos que entreviam no processo), infraestruturas, procedimentos das equipas e nos equipamentos biomédicos. Os efeitos destes MDF foram divididos em dois grupos, nomeadamente em tratamento cancelado e aplicação de dose indevida. Após conclusão do estudo, obtiveram-se para fins indicativos, o somatório de todos os Números de Risco Prioritários (NRP), sendo o valor total de 4804. Era objetivo deste estudo identificar melhorias no serviço aos utentes, através da diminuição do valor do indicador que consistia nas somas dos diversos resultados do NRP. Foram estudadas e implementadas formas para diminuir o valor deste indicador (soma dos NRP), assim os riscos associados ao elevador foram eliminados a partir do momento em que se deixou de ter que mudar de piso para efetuar um procedimento integrante no tratamento. As duplas verificações das equipas técnicas deste serviço, ao serem implementadas reduziram consideravelmente vários MDF. Também a introdução de dados para tratamento nos equipamentos de radioterapia deveriam ter procedimentos de segurança, bloqueios e *feedback* (após introdução de dados de tratamento) ou então a implementação de protocolos ou definições pré programadas. Com a implementação destas medidas corretivas o somatório dos NRP baixaram para 1320. Os autores deste estudo concluíram que a utilização da ferramenta FMEA, aplicada no setor da saúde assim como na indústria, gera uma análise dos MDF, as suas causas e respetivos efeitos que resulta numa considerável melhoria dos serviços, após mitigações orientadas com base nos resultados do NRP (López-Tarjuelo et al., 2014).

Noutro estudo de análise de risco, surgem comparações de NRP obtidos a partir de duas ferramentas distintas, ou seja, para além de se ter utilizado a ferramenta FMEA utilizou-se também a *modified healthcare* FMEA (m-HFMEA). O m-HFMEA surge através de modificações orientadas para a área da saúde a partir da ferramenta FMEA. Com a identificação do NRP a partir de cada uma das ferramentas, ao serem comparadas, obtiveram-se surpreendentes conclusões num serviço de radioterapia. Nesse serviço verificaram-se que existiam 85% de concordância dos resultados nas análises de risco. Nas vinte análises de maior risco três estão consideradas no FMEA, já a mesma consideração não se verificou no m-HFMEA, e vice-versa. Os autores deste estudo reiteram que para melhorar e perspetivar as análises de risco, independentemente de existirem alguns riscos desvalorizados entre ambas (FMEA e m-HFMEA), deve-se incrementar a qualidade nos serviços das UCS. Para tal a utilização destas ferramentas devem ser efetuadas simultaneamente (Rah et al., 2016).

3.6.2. Equipamentos biomédicos

O número cada vez maior de equipamentos biomédicos complexos exige que as UCS estabeleçam um programa de gestão, por forma a garantir que os equipamentos mais críticos sejam seguros, fiáveis e tenham um desempenho funcional pretendido. Inspeção, manutenção preventiva e testes nestes equipamentos, devem ser revistos continuamente para acompanhar os atuais avanços tecnológicos e as crescentes expectativas destas organizações.

Os departamentos de engenharia das UCS do Canadá, Austrália e Estados Unidos começam a aplicar estratégias de manutenção com resultados mais eficientes e económicos, deixando de seguir criteriosamente as recomendações dos fabricantes. Começaram a ser criados bancos de dados estatísticos de falhas, com o objetivo de serem devidamente tratados e utilizados para estabelecer políticas de manutenção otimizadas. Apesar de bem estabelecidos noutras indústrias, a engenharia da fiabilidade e aplicação de técnicas de otimização no campo da medicina é relativamente nova, pelo que melhorar e otimizar a gestão destes ativos em contexto operacional deve ser considerado (Taghipour, 2011).

Num artigo de revisão de Mahfoud et al. (2016), focado na otimização da manutenção preventiva no domínio dos cuidados de saúde são citadas 35 fontes, publicadas entre os anos de 2000 a 2015. Os autores deduzem que a política de manutenção otimizada ainda está num estágio inicial e que é uma área pouco explorada, propõem iniciativas e esforços para criar definições de estratégias para serem conseguidas.

Torna-se portanto necessário relacionar os modelos científicos de otimização de manutenção com os equipamentos biomédicos, pois na maioria das UCS apenas se seguem as recomendações dos

fabricantes de equipamentos, descartando o benefício da excelência na manutenção. Como noutros setores da área industrial, reforça-se a necessidade de avaliar a fiabilidade destes equipamentos em contexto operacional. Prova disto é que num estudo de fiabilidade de um determinado equipamento médico, concluíram que este tornava-se menos fiável seguindo as recomendações de manutenção preventiva do fabricante, do que outro equipamento idêntico (do mesmo modelo) sem tantas intervenções preventivas (Mahfoud et al., 2016).

No contexto das UCS, garantir que os equipamentos biomédicos estejam disponíveis e sejam fiáveis, são fatores que agregam valor aos serviços de saúde prestados por estas unidades. Para isso é necessário garantir que existam boas práticas de manutenção, que maximizem a disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos biomédicos.

Numa província da Zâmbia, foi feito um estudo para avaliar práticas de manutenção em três hospitais públicos e identificar quais as melhores políticas de manutenção ou, as mais apropriadas para os equipamentos biomédicos analisados. Concluiu-se com este estudo um fraco desempenho na avaliação das equipas de manutenção, devendo-se às inadequadas práticas implementadas nas equipas de manutenção. Este estudo propõe a implementação da metodologia RCM, com o objetivo de aumentar a disponibilidade dos equipamentos. No entanto as administrações destas UCS deverão alimentar o incentivo a (Mwanza & Mbohwa, 2015):

- Trabalhar em equipa, entre técnicos de manutenção e operadores de equipamentos - para facilitar o entendimento das falhas.
- Capacitar os colaboradores quanto às novas tendências de operação e manutenção dos equipamentos.
- Melhorar o sistema de base de dados para descrever convenientemente as tarefas de manutenção para apoiar à decisão da sua programação.

4. Análise Estatística

No presente capítulo descrevem-se métodos estatísticos para tratar dados empíricos em frequência e deduzir os parâmetros da função de *Weibull* que melhor aderem a um conjunto de dados. Descreve-se como tratar dados censurados, testes para validar uma distribuição estatística pelos testes de *Laplace*, *Kolmogorov-Smirnov* (KS) e Qui-Quadrado (QQ). Como estimar os respetivos parâmetros pelos métodos da Regressão Linear e Máxima Verosimilhança. Identificam-se as distribuições estatísticas mais comuns em fiabilidade e descreve-se detalhadamente a distribuição de *Weibull*, e analisa-se o seu comportamento através de alterações nos parâmetros de localização, forma e escala que a caracterizam. Com base nesta função, deduzem-se as expressões analíticas dos principais parâmetros de fiabilidade, como a PDF de falha, função de fiabilidade, função de probabilidade acumulada de falha e função de risco.

4.1. Metodologia para estimação paramétrica de distribuições estatísticas

Quando os dados históricos são escassos para serem considerados estatisticamente significativos na representação empírica da vida esperada de um componente, e se se pretende maior precisão na estimação da fiabilidade, deve-se optar pela seleção de funções teóricas de probabilidade. O mesmo acontece quando um equipamento é novo, onde não se possui qualquer experiência ou registos de falhas. Nesta situação deverão ser consultadas bases de dados, nomeadamente a dos fabricantes, utilizadores ou bases de dados públicas.

Os fabricantes determinam a fiabilidade (neste caso intrínseca ou “à saída da fábrica”) de um órgão a partir de ensaios normalizados, pois o resultado obtido é independente de condições reais de funcionamento.

Por outro lado os utilizadores podem determinar a fiabilidade extrínseca, ou seja a partir da experiência da sua aplicação prática e ao longo do tempo. Estes dados podendo ser fornecidos ao fabricante, contribuirá para uma atualização e enriquecimento de uma base de dados, tornando assim possível analisar e melhorar a conceção do componente, resultando em caso de necessidade num incremento de fiabilidade (se tecnicamente possível e economicamente viável). Esta fiabilidade é

portanto demonstrada, por ser obtida através do funcionamento real e por um longo período de tempo, como tal reveste-se de grande importância prática para o enriquecimento de uma base de dados.

Quando não existem dados, as taxas de falha podem ser estimadas com base em normas. Existem normas de fiabilidade que fornecem taxas de falha de muitos componentes elétricos, eletrônicos, não eletrônicos e mecânicos, em função das condições de utilização. As publicações *Military Standards* e *Military Handbooks* constituem referências originais, as mais frequentemente usadas são a MIL-STD-756, a MIL-HDBK-217F.

Quando a fiabilidade não é facultada pelo fabricante, torna-se necessário ponderar informação, a partir de equipamentos iguais ou semelhantes provenientes de diversas fontes, tais como bases de dados públicas, eventuais dados existentes na empresa, parceiros na indústria e conhecimento de engenheiros especialistas (*best engineering knowledge*) (Assis, 2014).

A partir da obtenção dos dados de falha, é possível encontrar a função teórica que melhor se ajusta (ou adere) recorrendo a testes de aderência de KS e QQ ou através de aplicações desenvolvidas em EXCEL por Assis (2014) ou *software* de ajustamento automático como o utilizado neste trabalho, o *ReliaSoft Weibull++/ALTRA PRO*.

Justamente na Figura 4.1, indicam-se os passos da metodologia utilizada para estimação paramétrica de distribuições estatísticas mais utilizadas em fiabilidade:

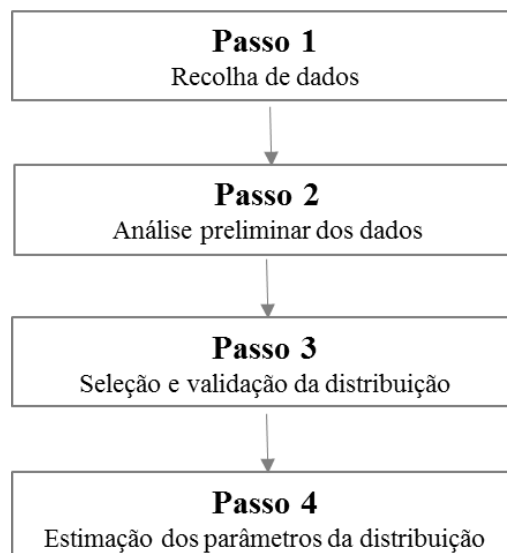


Figura 4.1: Metodologia para estimação paramétrica de distribuições estatísticas.

4.1.1. Passo 1: Recolha de dados

Os dados de falha do sistema podem ser obtidos de diversas fontes, conforme mencionado no ponto 4.1. O estudo desenvolvido nesta dissertação baseou-se em dados de falhas de idênticos modelos de ampolas de raios X (*Straton*), que também estavam instaladas em idênticos modelos de TC (*Siemens Definition Flash*), proporcionando os mais idênticos modos de funcionamento possíveis. O procedimento interno da empresa de manutenção, após a deteção da falha da ampola, realiza o registo do MDF e procede à encomenda da ampola substituta (trata-se de um componente não reparável), este registo é efetuado num bloco técnico em suporte de papel e assinado pelo cliente. Posteriormente, um colega administrativo armazena a informação técnica em base de dados – SAP. Estes procedimentos são realizados de forma criteriosa e homogênea por parte das equipas da *Siemens Healthineers Portugal*.

4.1.2. Passo 2: Análise preliminar de dados

Para que a distribuição estatística de fiabilidade seja precisa e de qualidade, é necessário analisar e caracterizar os conjuntos de dados de falha. Por exemplo, os conjuntos de dados de falha inicialmente fornecidos foram escritos em formato de papel pelo técnico no local, posteriormente introduzidos em sistema (SAP) por um outro técnico administrativo. Verificou-se, numa primeira análise detalhada dos conjuntos de MDF (juntamente com a equipa técnica da *Siemens Healthineers Portugal*), a existência de alguns dados vulgarmente chamados de “erros de simpatia”, devendo-se possivelmente à transcrição da informação nos formatos de papel em digital.

A fiabilidade humana diminui com o *stress* e a urgência, fácil se torna antecipar que aquela é mais difícil de prever do que a fiabilidade de sistemas inanimados (Assis, 2014).

Em sede de reunião, com a presença da equipa técnica da *Siemens Healthineers Portugal*, fez-se o cruzamento das informações escritas em formato de papel, digital e tempos de funcionamento da TC (acesso remoto ao computador local da TC em questão) e corrigiram-se aqueles TTF que suscitavam dúvidas. Prosseguiu-se à análise dos conjuntos de dados disponíveis, sendo divididos em dois tipos, dados completos e dados censurados. Entenda-se como dados completos os dados analisados até à falha, isto é, o tempo exato até à falha é conhecido, conforme ilustra o exemplo da Figura 4.2. Contrariamente, por vezes não se sabe o momento exato em que ocorreu a falha, essa incerteza classifica tais dados como dados censurados (ReliaSoft, 2014c).

Nos dados censurados à direita, verifica-se que o verdadeiro tempo de falha dos componentes não é conhecido e é superior ao tempo de funcionamento registado, conforme se exemplifica na Figura

4.3 (ReliaSoft, 2014c). Estes dados censurados à direita podem ainda ser classificados por um tempo pré-determinado, ou seja, quando se programa o tempo de duração do estudo ou por um número de falhas pré-determinado, utiliza-se esta censura quando se tem pouca ou nenhuma informação sobre a duração do tempo (Silva, 2016).

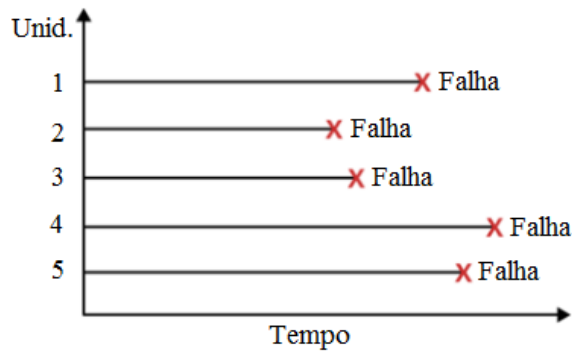


Figura 4.2: Dados completos de falha (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).

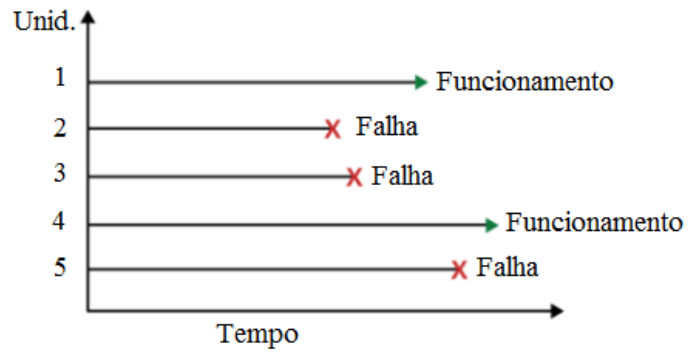


Figura 4.3: Dados censurados à direita (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).

Os dados são considerados censurados à esquerda se, o intervalo de tempo respetivo à falha se iniciou antes do início do registo ($t=0$), isto é, a falha aconteceu antes de se ter iniciado a contagem pois o componente já se encontrava em funcionamento, conforme se exemplifica na Figura 4.4.

A censura por intervalo, ilustrada na Figura 4.5 pode ser considerada como um caso mais geral de censura. Acontece quando por algum motivo não foi possível observar o tempo exato da falha, mas sim a ocorrência num certo intervalo de tempo. Este tipo de dados pode surgir quando o estado da unidade é verificada a cada inspeção. Se ocorreu uma falha entre inspeções não é conhecido o exato momento em que a falha ocorreu, mas apenas que a falha ocorreu dentro do intervalo de tempo entre inspeções ReliaSoft (2014c).

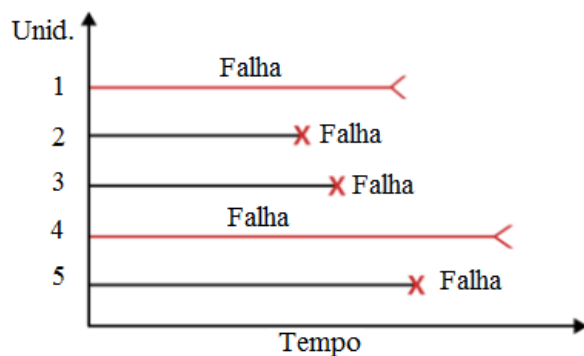


Figura 4.4: Dados censurados à esquerda (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).

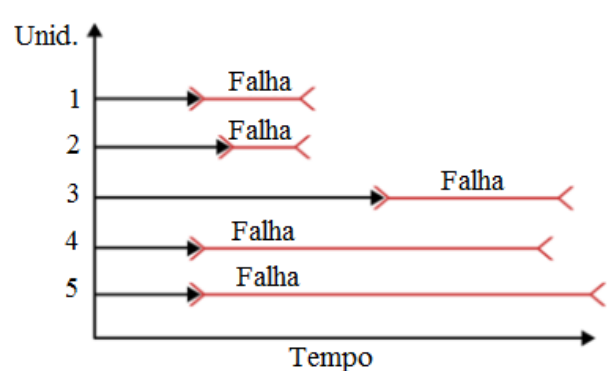


Figura 4.5: Dados censurados por intervalo (5 amostras), adaptado de ReliaSoft (2014c).

Também deverá ser considerada informação censurada, o momento em que o componente foi substituído em conformidade com uma ação de MPS ou por ter falhado devido a outro MDF, que não aquele sob observação. Contudo, se o componente foi substituído em resultado de uma MPC, já se deve considerar esse momento como tratando-se de uma falha, pois, embora ela não chegue a declarar-se, encontrava-se em curso (curva $P-F$). Para efeitos estatísticos, uma falha potencial conta como uma falha funcional – mesmo que esta tenha sido evitada (Assis, 2014).

A título de exemplo observe-se a Figura 4.6, onde se verifica o início do registo de falhas de dois componentes (A e B) em t_0 e a suspensão em t_{08} . Assim durante este período verificou-se o seguinte:

No **componente A**: dois intervalos TTF válidos (TTF_{34} e TTF_{47}), um intervalo t_{03} que deve ser censurado (à esquerda), pois a máquina já funcionava antes de t_0 , e t_{78} que deve ser censurado (à direita), pois o componente continuou operacional depois de t_8 .

No **componente B**: quatro intervalos TTF válidos (TTF_{01} , TTF_{12} , TTF_{56} e TTF_{68}) e um intervalo t_{25} que deve ser censurado, pois a paragem deveu-se a uma MPS e não a uma falha ou uma MPC (falha em curso).

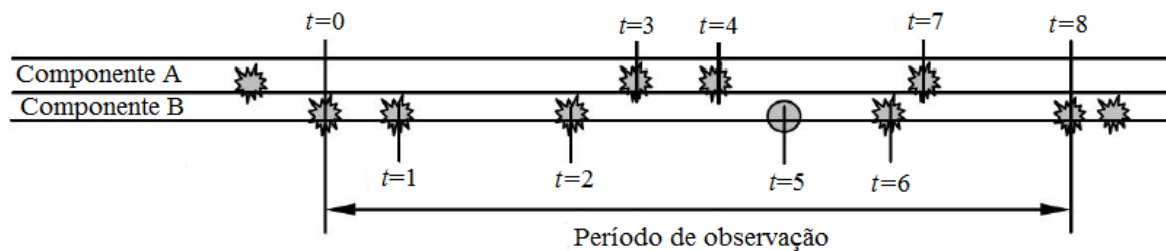


Figura 4.6: Sequência de falhas em dois componentes (Assis, 2014).

Assim se torna claro que, cada dado censurado informa-nos que o TTF correspondente seria sempre maior do que o tempo realmente observado.

4.1.3. Passo 3: Seleção e validação da distribuição

A seleção da distribuição envolve a escolha do modelo adequado para modelar o conjunto de dados de TTF. Existem diversos métodos através dos quais se torna possível antever qual a distribuição que melhor se ajusta. Através de dados de falha obtidos em componentes iguais, submetidos a condições semelhantes, em um ou mais equipamentos, é possível obter o MTTF.

Os procedimentos distinguem-se para sistemas reparáveis e não reparáveis e permitem avaliar os parâmetros estatísticos que evidenciem processos com taxa de falha crescente, decrescente ou constante e assim delimitar os modelos que teoricamente melhor se adequam a cada fenómeno.

Para interpretar a intensidade de falhas ou a taxa de ocorrência de falhas (*ROCOF – Rate of Occurrence of Failures*), a identificação do processo de *Poisson* torna-se evidente através da interpretação das tendências de TTF da Figura 4.7. Tais tendências podem ser estudadas não só para um componente ou LRU *per si* com vários MDF, mas a todos os componentes de um sistema. Neste último caso interessa saber se os TTF estarão a diminuir, em resultado de envelhecimento progressivo do sistema ou do aumento da severidade das condições de operação.

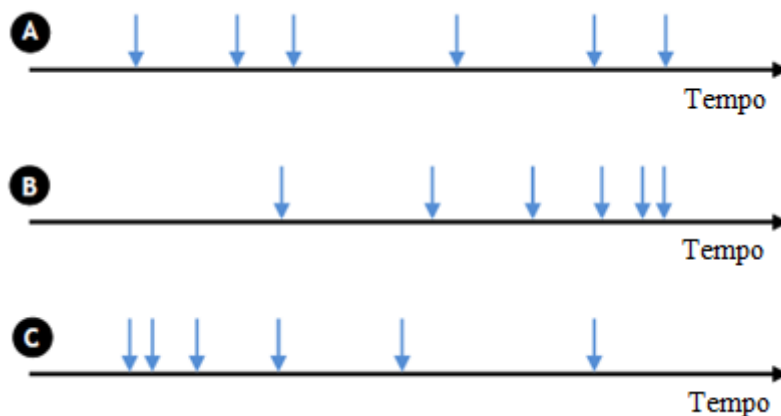


Figura 4.7: Possível tendência dos TTF

No **caso A** da Figura 4.7, não se observa uma tendência notória a partir dos TTF representados, podendo tratar-se de uma condição independente e identicamente distribuída (iid) ou Processo de *Poisson* Homogéneo (PPH), visto que os TTF dão-se independente da idade do equipamento, ou seja casualmente. Para os casos B e C verifica-se claramente uma tendência. No **caso B** é evidente uma diminuição entre TTF (período de degradação ou aumento da severidade das condições da operação) e no **caso C** um aumento entre TTF (período de mortalidade infantil), tratando-se portanto de processos de *Poisson* Não Homogéneos (PPNH).

Face à necessidade de se saber se os dados dos momentos de falha ou TTF correspondem (ou não) a um PPH, poderão aplicar-se métodos gráficos e métodos analíticos.

Entenda-se a importância de dispor os dados referentes aos TTF ordenados de forma cronológica, senão em caso contrário, a informação sobre tendência é perdida.

4.1.3.1. Método gráfico

O método gráfico mais simples para o teste de tendência é a representação gráfica do número acumulado de falhas em função do tempo. A Figura 4.8 ilustra possíveis gráficos que podem ser esperados.

Onde no **gráfico A** resulta numa linha reta, portanto pode ser assumida a inexistência de tendência e é aceite a mesma distribuição de tempo entre falhas, isto é, os TTF são iid logo é um PPH.

No **gráfico B** verifica-se uma tendência crescente, isto é, aumento de falhas num mesmo intervalo de tempo.

No **gráfico C**, está-se perante uma tendência decrescente de falhas ao longo do tempo, nestes dois últimos casos os dados TTF não são iid logo são ambos PPNH.

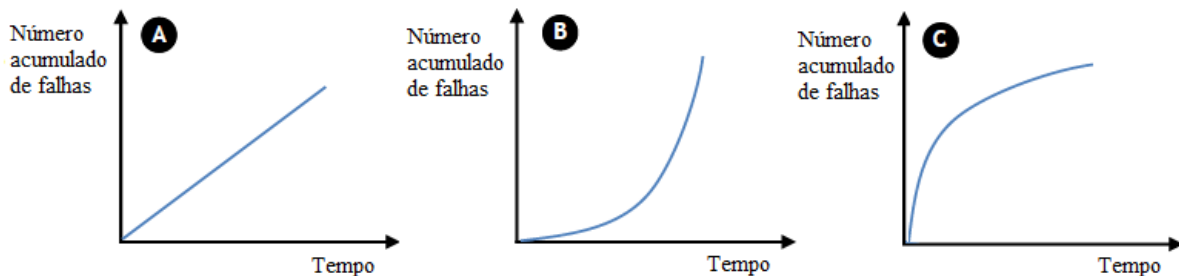


Figura 4.8: Número acumulado de falhas em função do tempo.

Este tipo de teste é muito simples de executar, no entanto quando se está perante uma tendência ligeira, pouco pronunciada, poderão suscitar dúvidas na interpretação gráfica, perante tal incerteza pode ser realizado um estudo analítico.

4.1.3.2. Teste de Laplace

Um método analítico possível é o teste estatístico de *Laplace* Z_T . Depois dos dados estarem devidamente tratados (2º passo), é necessário dispor cronologicamente os TTF acumulados de todos os componentes de um sistema, ou se for o caso dos vários MDF de um componente crítico.

Especifica-se a hipótese nula, H_0 , em confronto com a hipótese alternativa, H_1 .

Considere-se:

- Hipótese **nula** H_0 – Os TTF são iid (taxa de falhas constante)
- Hipótese **alternativa** H_1 – Os TTF não são iid (taxa de falhas não é constante)

Este teste pode ser limitado pelo tempo e assume a seguinte Expressão:

$$Z_T = \sqrt{12 \times N} \times \left[\frac{\sum_1^N t_i}{N \times T_0} - 0,5 \right] \quad (4.1)$$

Ou limitado pelo número de falhas:

$$Z_T = \sqrt{12 \times (N - 1)} \times \left[\frac{\sum_1^{N-1} t_i}{(N - 1) \times T_N} - 0,5 \right] \quad (4.2)$$

Sendo:

- t_i – Momento em que ocorreu a falha de ordem i
- N – Número acumulado de falhas
- T_0 – Momento final do teste limitado pelo tempo
- T_N – Momento final do teste limitado pela última falha

O critério de rejeição é dado pela seguinte condição:

$$Z_T < -Z_{\alpha/2} \text{ e } Z_T > Z_{\alpha/2}$$

Em que α é o nível de significância e $Z_{\alpha/2}$ é o valor da distribuição normal padronizado referente ao nível de significância. Sempre que se verificar esta condição rejeita-se a hipótese nula e o teste diz-se conclusivo.

O critério de aceitação é dado pela seguinte condição:

$$Z_T \geq -Z_{\alpha/2} \text{ e } Z_T \leq Z_{\alpha/2}$$

Sempre que se verificar esta condição aceita-se a hipótese nula e o teste diz-se inconclusivo.

Para uma melhor interpretação ilustra-se na Figura 4.9 a distribuição normal com os limites de teste Z bilaterais.

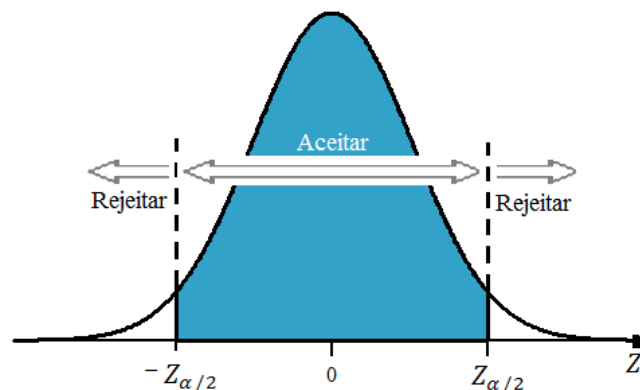


Figura 4.9: Z de teste e respectivos limites de aceitação e rejeição.

Note-se que os métodos de construção de curvas de probabilidade acumulada de falha e de determinação dos respectivos parâmetros são unicamente aplicáveis quando os TTF são iid (Assis, 2014).

Estando na presença de um PPH a independência dos dados é assim garantida, e torna-se possível selecionar e validar a função estatística teórica que melhor se ajusta, através de:

- Teste de hipóteses de aderência de KS ou o teste do QQ;
- *Software* de ajustamento automático *ReliaSoft Weibull++/ALTRA PRO*.

4.1.3.3. Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de ajuste ou aderência de KS consiste em encontrar a distância máxima entre a função de probabilidade acumulada de falha (PAF) esperada e a observada. Para tal, é necessário obter uma distância máxima entre as duas ($D_{m\acute{a}x}$). Posteriormente, irá ser confrontada com um valor teórico (D_{cr}), fornecido pela Tabela do anexo 6, com o nível de confiança pretendido. Assim, através deste teste é possível saber se a distribuição testada se ajusta à amostra. Seguidamente, descreve-se a metodologia do teste de KS num total de oito passos:

1º Passo – Ordenar todos os “tempos até à falha” por ordem crescente de valor.

2º Passo – Determinar o número total de falhas n .

3º Passo – Após cada falha sucessiva, determinar o número total de falhas já observadas f_i . Dividir este número pelo número total de falhas n . Cada um destes cálculos mostra a probabilidade observada de falha:

$$Q_o(t_i) = \frac{f_i}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

4º Passo – Dentro da mesma ordem calcular, utilizando a Expressão da distribuição selecionada, a probabilidade de falha teórica ou esperada ($Q_E(t_i)$), para cada falha que tenha ocorrido.

5º Passo – Determinar a diferença absoluta D'_i em módulo entre $Q_E(t_i)$ e $Q_o(t_i)$, calculando para cada falha:

$$D'_i = |Q_E(t_i) - Q_o(t_i)| \quad (4.4)$$

6º Passo – Determinar a diferença máxima absoluta ($D_{m\acute{a}x}$).

7º Passo – Na Tabela de valor crítico para o teste de KS apresentadas no Anexo 6, procurar o valor aceitável ou de diferença crítica (D_{cr}), para a amostra de tamanho n , no nível desejado de significância, geralmente 5%.

8º Passo – Se a diferença máxima absoluta calculada for menor que o valor crítico aceitável dado na Tabela, isto é,

$$D_{m\acute{a}x} < D_{cr} \quad (4.5)$$

Então a distribuição escolhida não é rejeitada como representativa dos dados de teste ou dados operacionais para o nível de significância escolhido. Se a diferença calculada for maior ou igual que o valor crítico aceitável, isto é,

$$D_{m\acute{a}x} \geq D_{cr} \quad (4.6)$$

Então a distribuição escolhida é rejeitada como representativa dos dados, para o nível de significância (α) escolhido.

4.1.3.4. Teste do Qui-Quadrado

O teste de ajuste ou aderência QQ tem como objetivo testar a hipótese das observações seguirem uma determinada distribuição. Este teste consiste na comparação da densidade com a função distribuição de probabilidades. Primeiramente torna-se necessário calcular o valor observado de χ_0^2 (Qui-Quadrado) para que seja posteriormente comparado a um valor crítico χ_{cr}^2 , fornecido pela Tabela do anexo 7. Através desta comparação, será possível analisar se a distribuição que está a ser testada se ajusta (ou não) aos dados da amostra, com o nível de confiança pretendido.

Seguidamente, descreve-se a metodologia do teste do QQ num total de seis passos:

1º Passo – Calcular a estimativa da média aritmética

A estimativa da média \bar{t} é definida como o valor da média aritmética dos dados t_i ou seja:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.7)$$

2º Passo – Calcular o desvio padrão

A estimativa do desvio padrão $\hat{\sigma}$ é dada por:

$$\hat{\sigma} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

3º Passo – Calcular o número de intervalos de classes

Ao desenvolver o histograma, os dados são agrupados num número adequado de intervalos de classes, e a frequência observada em cada intervalo é assim registada. O número ótimo de intervalos k poder ser estimado a partir da Regra de *Sturges*, ou seja:

$$k = 1 + 3,322 \cdot \log_{10} n \quad (4.9)$$

Onde, n é o tamanho da amostra. A largura da classe ω , é dada por:

$$\omega = \frac{r}{k} \quad (4.10)$$

Onde ($r = t_{máx} - t_{min}$) e ω é arredondado para o valor mais próximo de medida de precisão. Os valores iniciais da classe são determinados, iniciando-se pelo mínimo valor observado e adicionando-lhe sucessivamente a largura da classe ω . Os valores finais da classe são determinados adicionando a cada valor inicial de cada classe a quantidade $(\omega - \varepsilon)$, onde ε é a precisão. O limite inferior esperado de um intervalo de classe é determinado subtraindo a quantidade $\varepsilon/2$ ao valor inicial da classe e o limite superior é determinado adicionando $\varepsilon/2$ ao valor final da classe.

4º Passo – Determinar as frequências observadas

As frequências observadas em cada classe são determinadas pela contagem do número de observações dentro dessa classe.

5º Passo – Determinar a frequência esperada

A frequência esperada obtém-se multiplicando o número total de observações n , pela área sob a PDF da distribuição adotada, entre os limites superior e inferior da classe em questão. Para assegurar que a frequência total esperada coincide com a frequência total observada, a área sob a PDF à esquerda do limite inferior da primeira classe é incluída na área sob a primeira classe, e a área sob a PDF à direita do limite superior da classe n é incluída na área sob a última classe.

6º Passo – Determinar o valor do QQ

O valor do QQ, χ_0^2 é calculado a partir de:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (4.11)$$

Onde, o_i é a frequência observada na classe i , e e_i é a frequência esperada na classe i .

Se as frequências observadas forem idênticas às frequências esperadas, ou dito de outra forma, se os dados experimentais se ajustam exatamente à distribuição teórica, então o valor do QQ, χ_0^2 será zero. O valor de χ_0^2 é sempre positivo e finito, isto significa que, quanto maior for o valor de χ_0^2 , pior o ajuste dos dados experimentais à distribuição adotada.

Para a implementação do teste do QQ, o valor do χ_0^2 calculado através da expressão (4.11), é comparado com o valor crítico χ_{cr}^2 apresentado na Tabela do anexo 7. O valor de χ_{cr}^2 é escolhido de forma a que a área sob a PDF χ_0^2 à direita do χ_{cr}^2 , seja igual ao nível de significância α . Este valor de χ_{cr}^2 depende do número de graus de liberdade n , o qual é o parâmetro da PDF cujo χ_{cr}^2 é solicitado. Quanto maior o número de graus de liberdade, maior será o valor de χ_{cr}^2 para um determinado nível de confiança. O número de graus de liberdade n , é dado por:

$$n = k - 1 - m \quad (4.12)$$

Onde, k = número de classes, e m = número de parâmetros estimados para a amostra.

A razão de ter m na Expressão 4.12 é devido ao facto de m restrições serem impostas ao valor de χ_{cr}^2 . Como exemplo, na distribuição normal, $m = 2$, uma vez que a média e o desvio padrão devem ser estimados para os dados da amostra. A justificação para a Expressão $(k - 1)$ na Expressão 4.12 é devido ao facto que, se $(k - 1)$ das frequências esperadas for conhecido, a frequência nas restantes classes é determinada singularmente.

Tal como referido anteriormente, o valor do QQ calculado pela Expressão 4.11 é comparado com o valor crítico obtido do Anexo 7 (valor de χ_{cr}^2) correspondente ao nível de confiança pretendido $(1 - \alpha)$, ou nível de significância α e os graus de liberdade n .

Se o valor de QQ calculado é inferior ao valor crítico, o ajuste é considerado bom para o nível de confiança pretendido $(1 - \alpha)$, ou seja, se:

$$\chi_0^2 < \chi_{cr}^2 \quad (4.13)$$

Não se rejeita a distribuição testada pois é capaz de representar de uma forma aceitável os dados, com nível de confiança $(1 - \alpha)$. No entanto, se:

$$\chi_0^2 \geq \chi_{cr}^2 \quad (4.14)$$

Rejeita-se a distribuição ajustada.

A probabilidade de uma distribuição ser rejeitada por este teste não pode exceder o nível de significância (α), sendo (ou não) validado.

4.1.4. Passo 4: Estimação dos parâmetros da distribuição

Após determinação da distribuição estatística que melhor se ajusta aos dados de TTF, surge a necessidade de estimar os parâmetros dessa distribuição. Apesar de existirem vários métodos, irão ser referidos apenas dois, sendo o método gráfico da Regressão ou Mínimos Quadrados e o método analítico da Máxima Verosimilhança.

Desta forma, recomenda-se a utilização do Método da Regressão ou Método dos Mínimos Quadrados para pequenas amostras, sem dados censurados, e a utilização do método da Máxima Verosimilhança para grandes amostras, mesmo que contendo dados censurados (Sobral, 2010), (ReliaSoft, 2014b)

4.1.4.1. Método da Regressão (ou Método dos Mínimos Quadrados)

O método da regressão ou dos mínimos quadrados consiste em minimizar o quadrado da distância (segundo uma determinada direção) de uma reta aos pontos representativos da distribuição que se pretende caracterizar. Esta distância entre a reta e cada ponto é chamada de resíduo e pode ser aplicada na direção de x ou de y , conforme ilustra a Figura 4.10.

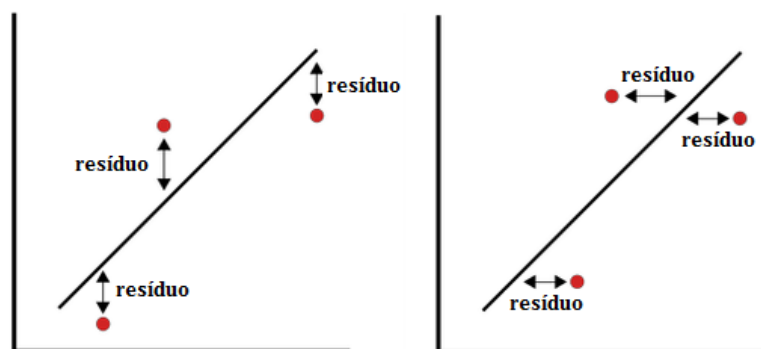


Figura 4.10: Exemplo de regressão linear em x e em y , adaptado de ReliaSoft (2014b).

Como o processo é semelhante em cada uma delas, apenas será apresentada a regressão em y . Na Figura 4.10 estão representados três pontos, é possível visualizar que quanto menor a distância na vertical (lado esquerdo) e a distância na horizontal (lado direito) entre a reta estimada representada e os

pontos, isto é, quanto menor forem os resíduos em y ou em x respetivamente, mais a equação da reta se ajusta ao comportamento que os pontos descrevem. A reta que se encontra representada é estimada a partir da amostra e é aquela para qual a soma dos resíduos ao quadrado é mínima (Fernandes, 2013).

Assumindo o conjunto de dados $(x_1; y_1), (x_2; y_2), \dots, (x_N; y_N)$, sendo os vários valores de x conhecidos, então de acordo com o princípio da regressão linear (ou dos mínimos quadrados), a equação da linha reta que mais se adequa a esses dados é (ReliaSoft, 2014b):

$$y = \hat{a} + \hat{b}x \quad (4.15)$$

Onde \hat{a} e \hat{b} correspondem aos valores estimados da reta, identificando o cruzamento da mesma com o eixo das ordenadas e a sua inclinação, respetivamente. Pretende-se que a soma das distâncias na vertical entre os pontos representados e a reta seja mínima, ou seja:

$$\sum_{i=1}^n (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i)^2 \quad (4.16)$$

n corresponde ao número total de dados. Estas equações são assim minimizadas pelos respetivos estimadores:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (4.17)$$

e:

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (4.18)$$

A reta de regressão encontra-se ajustada aos dados empíricos tanto mais quanto maior for o coeficiente de determinação r^2 , o qual pode assumir valores entre zero e um (Assis, 2014).

Os valores de x são conhecidos e correspondem aos TTF ordenados e logaritmizados, no entanto a melhor estimativa para se obter os valores do eixo das ordenadas $F(t_j)$ é através dos *ranks* medianos, isto é, consiste em determinar os valores das medianas e não das médias, dos sucessivos números de ordem j . Uma boa aproximação para o cálculo desses valores, é através do método expedito da aproximação de *Bernard*:

$$F(t_j) = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (4.19)$$

Sendo j o número de ordem da falha e n o número total de falhas.

O método do *Rank* Mediano é usado para obter uma estimativa da probabilidade de falha acumulada. O *Rank* mediano é o valor que a verdadeira probabilidade de falha $F(t_j)$, deverá ter na n -ésima falha de uma amostra de N unidades com um nível de confiança de 50%. Desta forma o *Rank* mediano pode ser determinado através da distribuição binomial acumulada, igualando a mesma a 0,50.

Em manutenção de equipamentos, os dados sobre TTF são frequentemente escassos, pelo que os dados censurados não deverão ser ignorados. É sabido que um dado censurado informa que o TTF correspondente seria maior do que observado, pelo facto de não se tratar de uma falha verdadeira. Assim existe a necessidade de se corrigir os TTF censurados.

O *Rank* mediano corrigido para dados censurados são calculados seguindo três passos (Assis, 2014):

1. Listar os TTF por ordem crescente.
2. Para cada item falhado, calcular o número de ordem médio i_{t_j} através da Expressão:

$$i(t_j) = i(t_{j-1}) + N(t_j) \quad (4.20)$$

Em que:

$$N(t_j) = \frac{(n + 1) - i(t_{j-1})}{1 + (n - n^{\circ} \text{ de itens precedentes})} \quad (4.21)$$

Em que n representa a dimensão da amostra.

3. Calcular o *rank* mediano corrigido para cada item falhado.

Por exemplo, veja-se como proceder para obter uma estimativa de parâmetros, que no caso mais comum trata-se da distribuição de *Weibull*. Através da respetiva PAF, $F(t)$, consiste em transformar (logaritmizando) a função numa reta de regressão linear.

Assim tem-se:

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \Leftrightarrow \frac{1}{R(t)} = e^{\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln\left(\frac{1}{R(t)}\right) &= \left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha \Leftrightarrow \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{R(t)}\right]\right\} = \alpha[\ln(t-t_0) - \ln\beta] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1-F(t)}\right]\right\} &= -\alpha \ln\beta + \alpha \ln(t-t_0) \end{aligned} \quad (4.22)$$

No segundo membro desta equação os termos:

- $-\alpha \cdot \ln \beta$, corresponde à interceção das ordenadas na origem das abcissas \hat{a}
- α , corresponde ao declive da reta \hat{b}
- $\ln(t - t_0)$, corresponde ao eixo das abcissas

Tabela 4.1: Tabela resumo de expressões das distribuições estatísticas

Distribuição	Função PAF	Função PAF (EXCEL)	eixo Yy	eixo Xx
Exponencial neg.	$1 - e^{-\lambda t}$	expodist (t;λ; 1)	$\ln[1 - F(t)]$	t
Weibull	$1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha}$	weibull (t - t ₀ ; α; β; 1)	$\ln\{-\ln[1 - F(t)]\}$	ln t
Normal	$\Phi(z)$ *	norminv (t;μ; σ; 1)	$\Phi^{-1}[F(t)]$	t
Lognormal	$\Phi(z')$ **	lognormdist (t;μ _y ; σ _y)	$\Phi^{-1}[F(\ln t)]$	ln t

$$* z = \frac{(t-\mu)}{\sigma} ; \Phi(z) = \int_{-\infty}^t f(t) \cdot dt = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(t-\mu)}{\sigma}\right]^2} \cdot dt$$

$$** z' = \frac{(\ln(t)-\mu')}{\sigma'} ; \Phi(z') = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma' \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(\ln(t)-\mu')}{\sigma'}\right]^2} \cdot dt$$

4.1.4.2. Método da Máxima Verosimilhança

Para se obter uma estimativa de parâmetros com base numa curva de frequências acumuladas de falha de uma função $F(t)$, pode-se usar para além do método atrás descrito em 4.1.4.1 que é preferido pelos engenheiros, o método da máxima verosimilhança que é preferido pelos estatísticos (Assis, 2014).

O método aqui explicado diz respeito a dados de falha completos ou verdadeiros (desprezando dados censurados). O princípio do método da máxima verosimilhança é obter os valores mais prováveis dos parâmetros da distribuição presumida. Matematicamente é formulado da seguinte forma (ReliaSoft, 2014b):

Se x for uma variável aleatória contínua com uma PDF, dada por:

$$f(x; \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) \quad (4.23)$$

Ou se x for uma variável aleatória discreta com uma função de probabilidade:

$$p(x; \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) \quad (4.24)$$

Onde $(\theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k)$, são k parâmetros que necessitam de ser estimados, com N observações independentes $(x_1, x_2, \dots; x_N)$, de forma que a função de máxima verosimilhança seja dada por:

$$L(x_1, x_2, \dots; x_N | \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) = L = \prod_{i=1}^N f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.25)$$

A Expressão 4.25 é aplicável para as variáveis aleatórias contínuas. A Expressão (4.26) define a função da máxima verosimilhança para as variáveis aleatórias discretas:

$$L(x_1, x_2, \dots; x_N | \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) = L = \prod_{i=1}^N p(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.26)$$

A função logarítmica da verosimilhança para variáveis aleatórias contínuas é dada por:

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^N \ln f(\theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) \quad (4.27)$$

A mesma Expressão para as variáveis discretas é dada por:

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^N \ln p(\theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k) \quad (4.28)$$

Os estimadores da máxima verosimilhança de $(\theta_1, \theta_2, \dots; \theta_k)$ são as soluções das equações.

$$\frac{\delta \Lambda}{\delta \theta_j} = 0, \text{ com } j = 1, 2, \dots, k \quad (4.29)$$

O que torna as condições necessárias, e

$$\frac{\delta^2 \Lambda}{\delta^2 \theta_j} < 0 \quad (4.30)$$

Representa as condições suficientes.

4.2. Distribuições estatísticas mais comuns em fiabilidade

Quando se obtém dados de tempo até à falha de um determinado componente, o grande desafio é saber qual das distribuições é que melhor se ajusta. Desta forma, os testes referidos em 4.1.3 permitem aferir e encontrar essa distribuição.

As funções estatísticas mais comuns em fiabilidade ou as mais frequentemente usadas para representar a vida de componentes são (ReliaSoft, 2014a):

- Função de *Weibull*
- Função Exponencial Negativa
- Função Normal
- Função Normal logarítmica

Então verifica-se que uma única função estatística não é adequada a todas as circunstâncias que descrevam a vida de um componente (Assis, 2014).

No entanto a distribuição que presumivelmente melhor se ajusta aos dados de tempos até à falha é a distribuição de *Weibull* devido à grande flexibilidade, isto é, engloba funções com intensidades de falha constantes, crescentes e decrescentes, dependendo do parâmetro de forma (Silva, 2016).

Para Antunes (2015), esta distribuição estatística é uma das mais utilizadas ao nível da ciência e nomeadamente da fiabilidade, devido à sua elevada exatidão.

Face às características de ajuste e versatilidade anunciadas, a função de *Weibull* transforma-se numa função Exponencial Negativa quando o parâmetro de forma toma o valor de 1, numa distribuição Logarítmica Normal quando toma o valor de 2 e numa distribuição Normal quando toma valores entre 2,6 e 3,7 (Assis, 2014).

Estas distribuições tornam-se casos particulares da distribuição de *Weibull* (Sobral, 2010).

No presente trabalho apenas será explicado com o devido detalhe a distribuição estatística de *Weibull*.

Distribuição *Weibull*

A distribuição de *Weibull* foi utilizada pela primeira vez por *Waloddi Weibull* em 1939 nos seus estudos de resistência de materiais. Esta distribuição é bastante flexível e é muito utilizada em análise de fiabilidade por ser capaz de se adaptar à grande maioria das situações práticas, bastando fazer variar algum dos seus parâmetros (Fernandes, 2013).

Devido à sua versatilidade torna-se possível descrever o tempo de vida até à falha de componentes sujeitos a fenómenos de degradação (desgaste, corrosão, fadiga, fluência ou

simultaneidade de alguns destes) exemplos disso são a maioria de componentes mecânicos e elétricos (Assis, 2014).

Constata-se não haver uma convenção consistente na literatura para a representação dos parâmetros da distribuição de *Weibull* (Silva, 2016). Esta dissertação representa o parâmetro de localização por t_0 , o parâmetro de escala por β e o parâmetro de forma por α conforme utilizado por Assis (2014).

A PDF da distribuição de *Weibull* triparamétrica tem a seguinte forma (Assis, 2014):

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t - t_0}{\beta} \right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.31)$$

Sendo:

t – Representação do tempo, ciclos de funcionamento ou qualquer outra medida descritiva de duração de vida

t_0 – Parâmetro de localização, representa o menor valor assumido por t

α – Parâmetro de forma, traduz o mecanismo de degradação

β – Parâmetro de escala, corresponde ao valor característico ou vida característica

e – Base dos logaritmos neperianos $e = 2,7183$ (dizima infinita não periódica)

Na análise dos dados de fiabilidade, o parâmetro de localização é frequentemente omitido. O parâmetro de localização diferente de zero não deve ser usado a menos que haja uma justificação física para um período com uma probabilidade de falha igual a zero (Silva, 2016).

A função PDF de *Weibull* biparamétrica (com $t_0=0$) tem a seguinte forma:

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t}{\beta} \right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.32)$$

A função PDF de *Weibull* monoparamétrica ou função exponencial negativa (com $t_0=0$ e $\alpha = 1$) tem a seguinte forma:

$$f(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad (4.33)$$

Ao integrar-se a expressão (4.31) triparamétrica entre 0 e ∞ , obtém-se a função acumulada de falhas:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.34)$$

E o seu complementar é a função fiabilidade $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.35)$$

Ao integrar-se a expressão (4.32) biparamétrica (com $t_0 = 0$), obtém-se a função acumulada de falhas:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.36)$$

E o seu complementar é a função fiabilidade $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.37)$$

Ao integrar-se a função (4.33) monoparamétrica (com $t_0=0$ e $\alpha = 1$), obtém-se a função acumulada de falhas:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad (4.38)$$

E o seu complementar é a função fiabilidade $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad (4.39)$$

A função de risco ou intensidade de falha $h(t)$ pode ser obtida a partir de:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.40)$$

Substituindo o numerador e o denominador pelas Expressões (4.31) e (4.35) respetivamente:

$$h(t) = \frac{\frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t-t_0}{\beta}\right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha}}{e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha}} = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t-t_0}{\beta}\right]^{\alpha-1} \quad (4.41)$$

Se $t_0 = 0$ obtém-se a função $h(t)$ biparamétrica:

$$h(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t}{\beta}\right]^{\alpha-1} \quad (4.42)$$

Se $t = 0$ e $\alpha = 1$ obtém-se a função $h(t)$ monoparamétrica:

$$h(t) = \frac{1}{\beta} \quad (4.43)$$

A título de exemplo, a Figura 4.11 representa todas as funções acima descritas e que são representativas da vida de um componente.

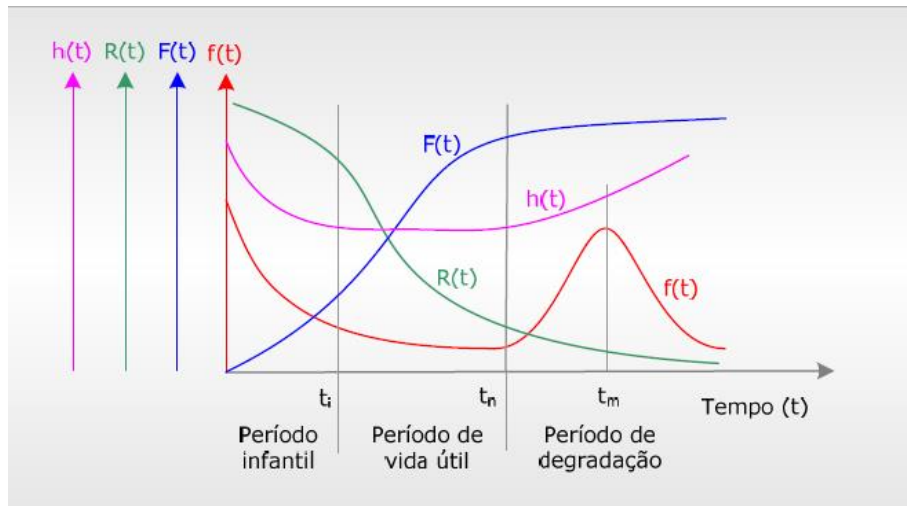


Figura 4.11: Representação gráfica das funções $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $h(t)$ (Assis, 2014).

O efeito da variação dos parâmetros de localização, forma e escala da distribuição de *Weibull* são descritos seguidamente para as funções $f(t)$, $h(t)$, $F(t)$, $R(t)$.

Outra Expressão com aplicação prática é a do MTTF:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t). dt = t_0 + \beta. \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4.44)$$

Sendo Γ a função Gama, ou recorrendo ao EXCEL:

$$MTTF = t_0 + \beta. EXP \left(GAMMALN \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right) \quad (4.45)$$

Ainda outra Expressão com interesse prático é a que permite calcular o tempo t em falta até que a probabilidade acumulada de falha $F(t)$ seja alcançada.

$$t = t_0 + \beta. \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} = t_0 + \beta. [-\ln(R(t))]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.46)$$

Varição do parâmetro de localização t_0 com α e β fixos: O parâmetro de localização t_0 tal como o nome indica, localiza a distribuição de *Weibull* ao longo da abcissa. Quanto maior este for mais a PDF se desloca no sentido positivo do eixo das abcissas (tempo, km, ciclos, manobras, etc.), mantendo a forma inalterável. Exemplo da função biparamétrica é quando este parâmetro é zero, ou seja, ausência de t_0 conforme mostra a curva a azul da Figura 4.12. As outras curvas são triparamétricas.

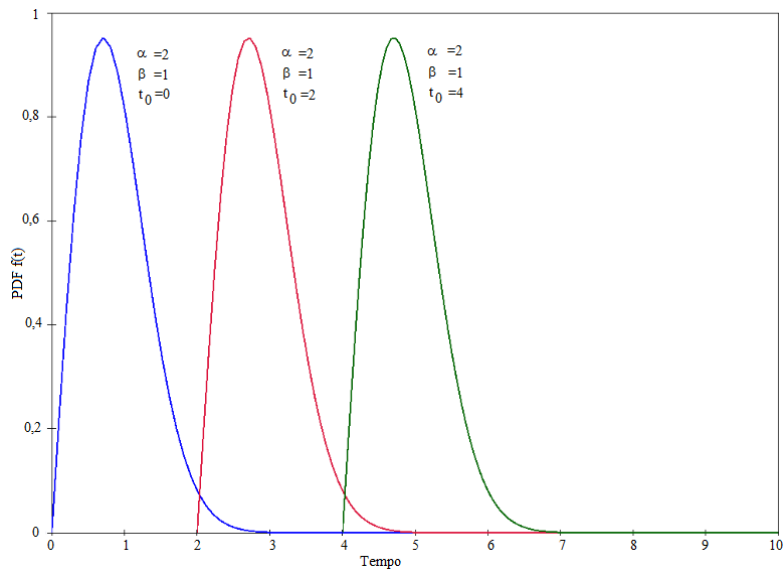


Figura 4.12: Função $f(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0

Também a função $h(t)$, dependendo do parâmetro de localização t_0 desloca-se no sentido positivo do eixo das abcissas (tempo), mantendo a sua forma inalterável, conforme Figura 4.13.

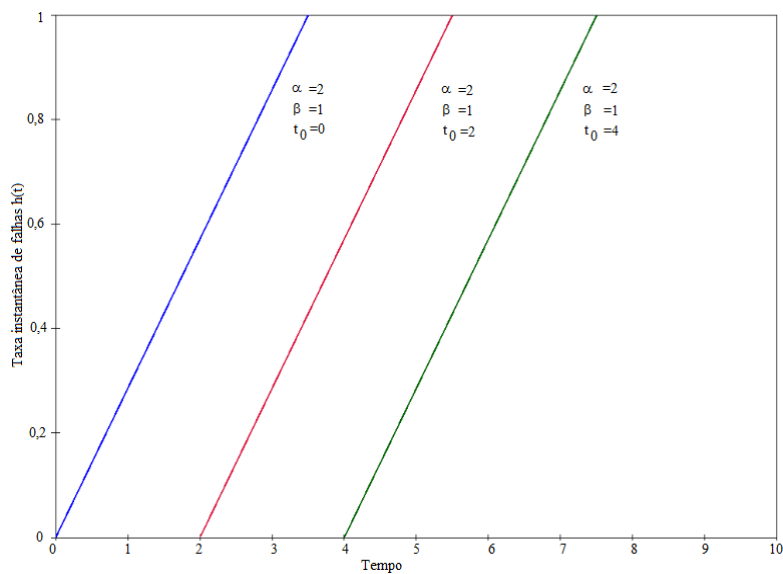


Figura 4.13: Função $h(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0

Também a função $F(t)$ desloca-se no sentido positivo do eixo das abcissas, mantendo a sua forma inalterável. Entre $t=0$ e t_0 a probabilidade acumulada de falhas é zero, aumentando a partir daí conforme se pode ver na seguinte Figura 4.14.

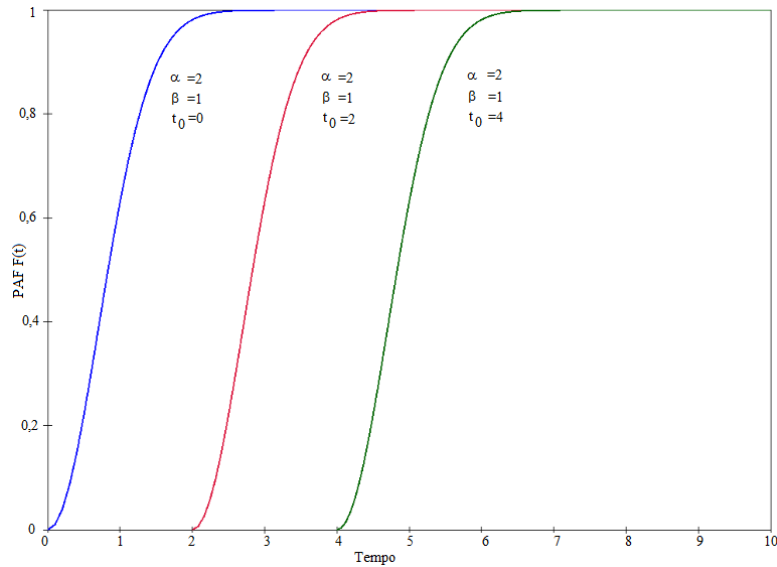


Figura 4.14: Função $F(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0

Também a função fiabilidade, $R(t)$, desloca-se no sentido positivo do eixo das abcissas, mantendo a sua forma inalterável. Verifica-se também que entre $t=0$ e t_0 , a fiabilidade não se altera e é máxima (igual a 1), decrescendo a partir de t_0 conforme se pode ver na Figura 4.15.

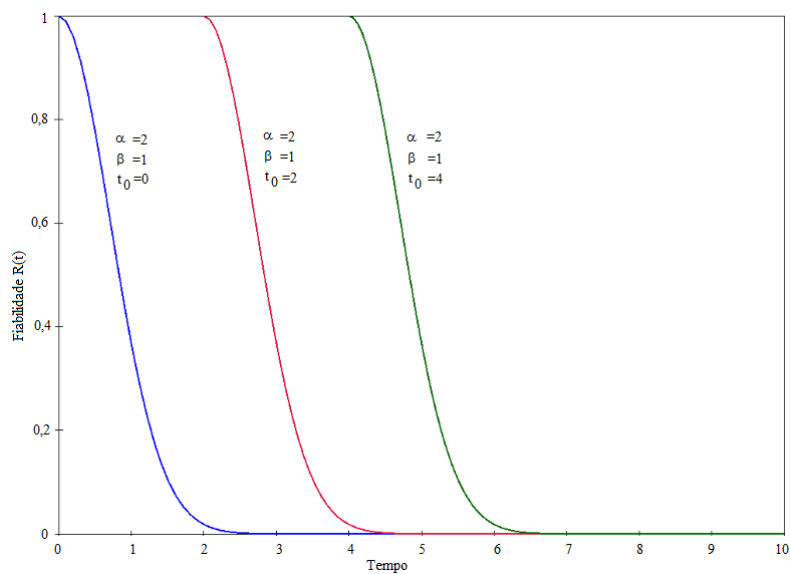


Figura 4.15: Função $R(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro t_0

Variação do parâmetro de forma α com t_0 e β fixos: O parâmetro de forma α traduz o mecanismo de degradação, a física da falha. Determina a forma da PDF e caracteriza a tendência da função $h(t)$.

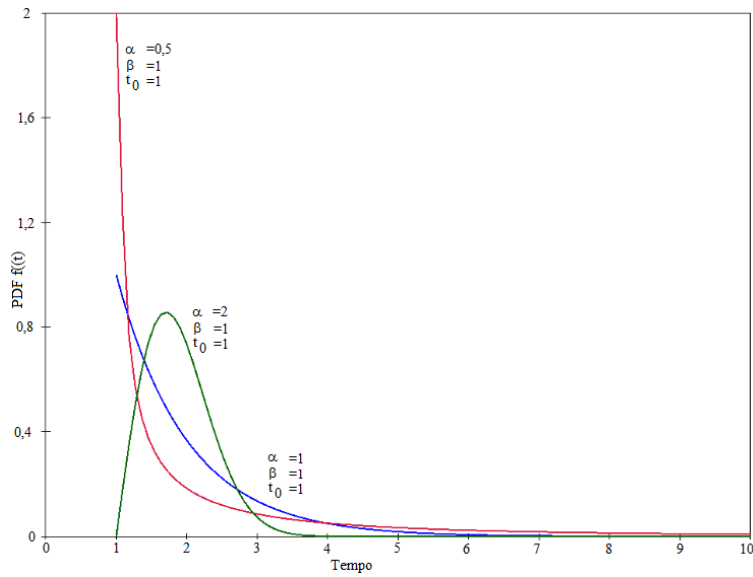


Figura 4.16: Função $f(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro α

Pode-se observar na Figura 4.16 que, quando $0 < \alpha < 1$ a PDF é exponencialmente decrescente. Para $\alpha = 1$ a distribuição de Weibull reduz-se à distribuição Exponencial. Quando $\alpha > 1$ a PDF está inclinada para a direita. Face à grande versatilidade desta distribuição, quando $3 \leq \alpha \leq 4$, a PDF tem aproximadamente a forma de um sino e pode ser aproximada à distribuição Normal ou Gaussiana.

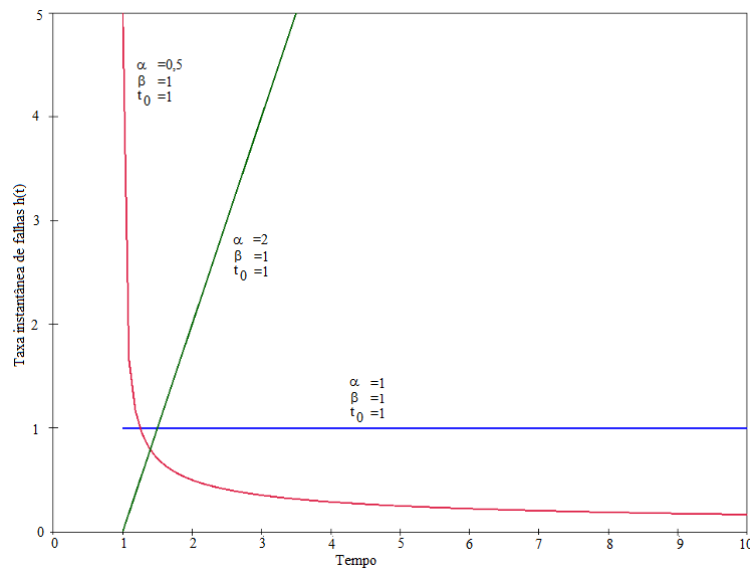


Figura 4.17: Função $h(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro α

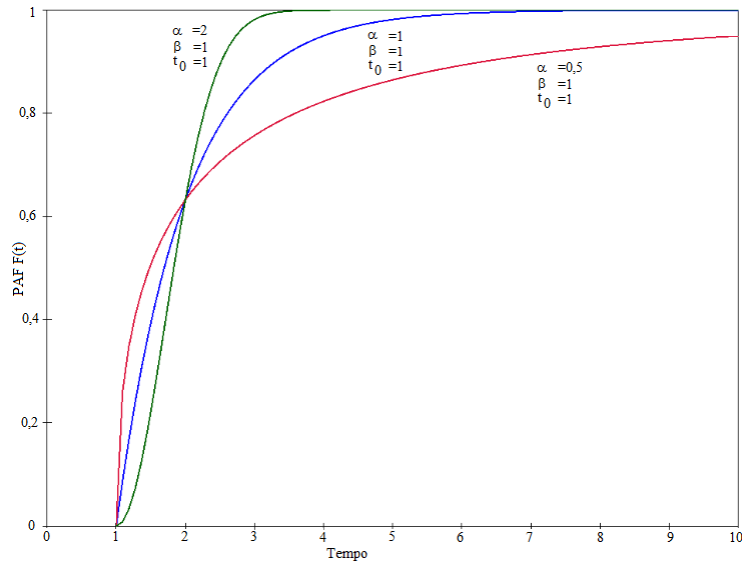


Figura 4.18: Função $F(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro α

Notar que a curva da banheira identificada no padrão A da Figura 3.1 pode ser aqui caracterizada. Como se pode observar na Figura 4.17, quando $0 < \alpha < 1$ verifica-se o período infantil, pois a função $h(t)$ é exponencialmente decrescente. Para $\alpha = 1$ verifica-se o período de vida útil, a função $h(t)$ é constante e igual a $1/\beta$ (neste caso $\beta = \text{MTTF}$). Quando $\alpha > 1$ verifica-se o período de degradação, a função $h(t)$ é crescente. Um caso particular verifica-se quando $\alpha = 2$; a função $h(t)$ é linearmente crescente, e segue uma distribuição Logarítmica Normal. Nas Figuras 4.18 e 4.19, para um α mais elevado, a PAF e a fiabilidade têm uma variação mais suave no início e mais abrupto de seguida. Para um valor de α mais pequeno, verifica-se o oposto, a PAF e a fiabilidade são mais abruptas no início, mas com tendência a suavizar este declive com o tempo.

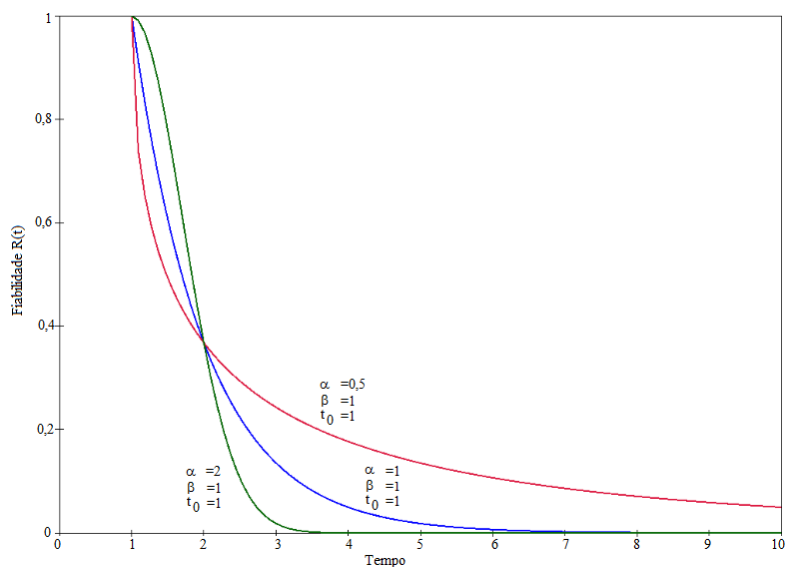


Figura 4.19: Função $R(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro α

Variação do parâmetro de escala β com α e t_0 fixos: Este parâmetro tem um efeito de “esticar” a distribuição para a direita ao longo do eixo das abcissas, ou pressiona-la para a esquerda, conforme se visualiza na Figura 4.20. De facto, a alteração deste parâmetro condiciona a escala das abcissas e quanto maior este for, mais a função tenderá a planificar-se. O parâmetro β tem a mesma unidade que o parâmetro de localização t_0 .

O parâmetro β , também conhecido por vida característica, corresponde ao momento em que 63,2% da população terá falhado, este valor demonstra-se quando se iguala o valor de t ao valor β .

Considere-se a Expressão 4.34 com $t_0 = 0$ e $t = \beta$:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} = 1 - e^{-\left(\frac{\beta}{\beta}\right)^\alpha} = 1 - e^{-(1)^\alpha} = 1 - e^{-1} \cong 0,632$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - 0,632 = 0,368 = 36,8\%$$

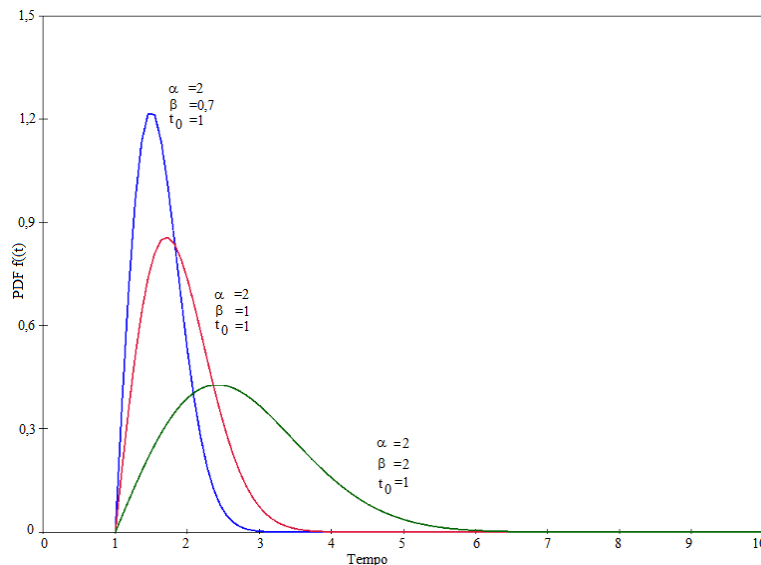


Figura 4.20: Função $f(t)$ de *Weibull* para diferentes valores do parâmetro β

Quanto maior for β , menor será a taxa de instantânea $h(t)$ de falhas, conforme se constata na Figura 4.21.

Este parâmetro β também se refere à escala das funções PAF e fiabilidade, Figuras 4.22 e 4.23 respetivamente, sendo que para valores mais elevados de β estas funções tomam formas mais alargadas. Estas funções demonstram ter um declive mais suave com um β mais elevado

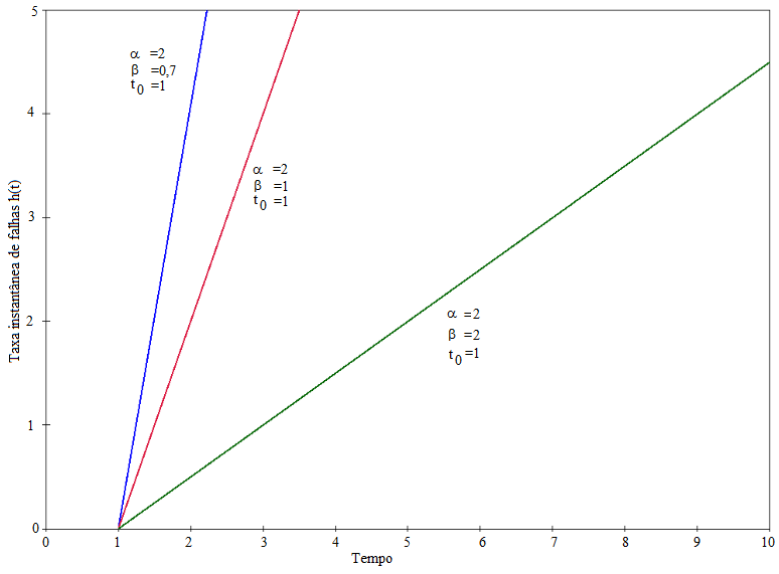


Figura 4.21: Função $h(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro β

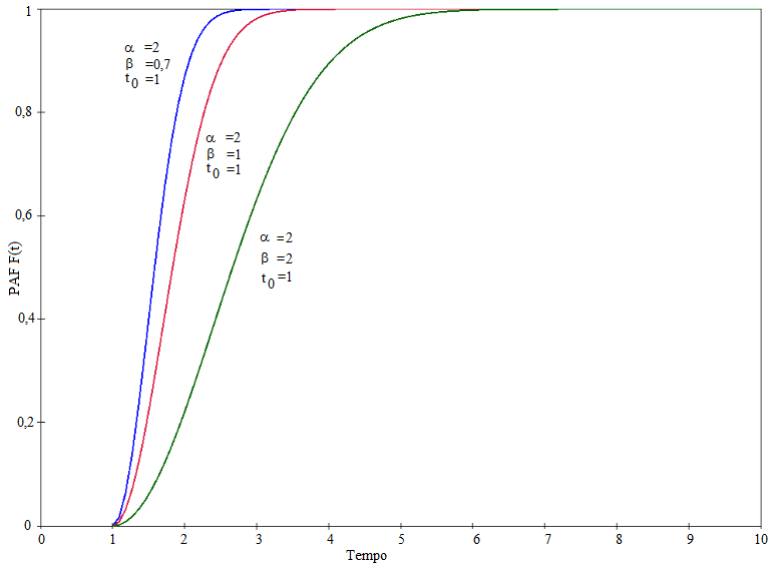


Figura 4.22: Função $F(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro β

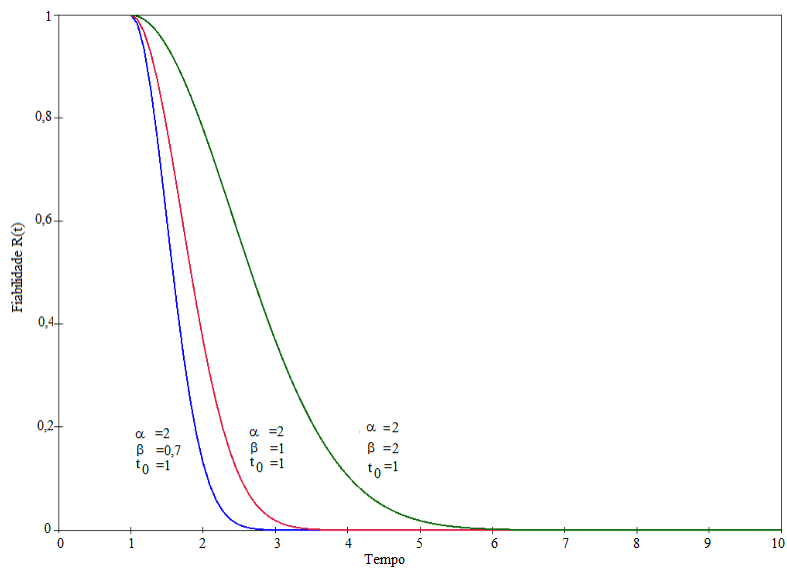


Figura 4.23: Função $R(t)$ de Weibull para diferentes valores do parâmetro β

5. Fundamentos Teóricos da Radiação Ionizante

No presente capítulo faz-se um enquadramento teórico generalizado à radiação eletromagnética, onde se insere a radiação ionizante (raios X). Explica-se generalizadamente o funcionamento de uma TC, e, as respetivas especificações técnicas do equipamento utilizado no caso de estudo. Descreve-se como são gerados os raios X para aquisição de imagem e explica-se detalhadamente o funcionamento de uma ampola de raios X *Straton*.

5.1. Enquadramento

A ampla gama de Radiação Eletromagnética (REM) é caracterizada pelo comprimento de onda, frequência e energia por fóton, conforme se ilustra na Figura 5.1 o espectro eletromagnético é dividido em categorias, incluindo o espectro de rádio, sistemas de telemóvel, assim como outras tecnologias de comunicação sem fios, radiação infravermelha, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama (Bushberg et al. 2012).

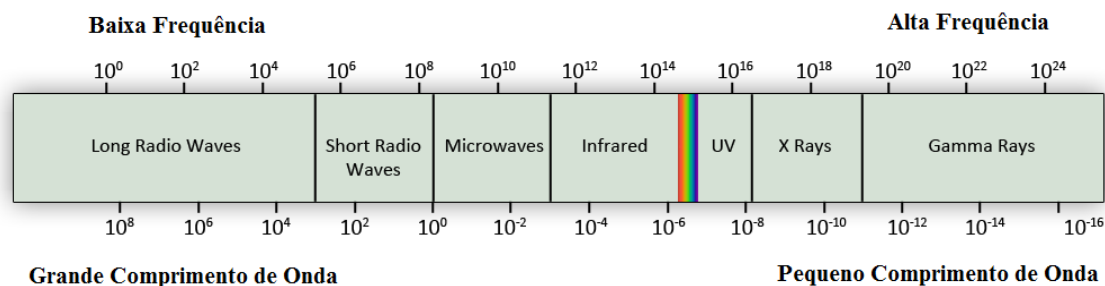


Figura 5.1: Espectro de radiação eletromagnética, adaptado de (Wave & Wave, 2005).

A radiação é desprovida de massa, não é afetada por campos elétricos ou magnéticos e tem velocidade constante num determinado meio homogéneo. Embora a REM se propague através da matéria, ela não requer matéria para se propagar, a sua velocidade máxima ($2,998 \times 10^8$ m/s) ocorre no vácuo. A REM viaja em linhas retas, no entanto a sua trajetória pode ser alterada pela interação com a matéria. A interação da REM pode ocorrer por espalhamento (mudança na trajetória), absorção (remoção da radiação) ou, em energias muito mais altas, transformação de radiação em partículas, ou seja, conversão de energia em massa (Bushberg et al., 2012).

Várias formas de REM são usadas em diagnóstico por imagem, por exemplo os raios X são produzidos fora do núcleo dos átomos, nas camadas eletrônicas e são usados em equipamentos de imagem médica destacando-se a radiografia, fluoroscopia e TC.

Desde sempre o Homem está exposto a radiação proveniente de fontes naturais, e mais recentemente de fontes artificiais. Relativamente à radioatividade natural, há que ter em conta que existem pequenas quantidades de urânio, tório e outros elementos radioativos na crosta terrestre e que contribuem para a exposição da totalidade da população. A atividade em causa depende fortemente do tipo de solo. Estes materiais, porque contêm ínfimas quantidades de materiais radioativos, emitem baixos níveis de radiação ionizante. Outra fonte de exposição natural são os raios cósmicos, a grande maioria destes são filtrados pela atmosfera mas, em locais de grande altitude ou em voos comerciais, a exposição pode ser considerável, ao contrário do que sucede ao nível do mar. Curiosamente os raios cósmicos podem também interagir com átomos na atmosfera terrestre criando isótopos radioativos como o Carbono-14 (Morais, 2015).

Para que ocorra ionização, a energia dessa radiação deve ser superior ao valor da energia de ligação dos eletrões com o seu núcleo, isto é, energia de radiação ionizante capaz de remover eletrões das suas órbitas (Nouailhetas et al., 2008).

A radiação ionizante, pela sua elevada energia é capaz de penetrar na matéria biológica, ionizar os átomos, romper ligações químicas e causar danos nos tecidos biológicos nomeadamente no material genético (Morais, 2015). Conforme se exemplifica na Figura 5.2.

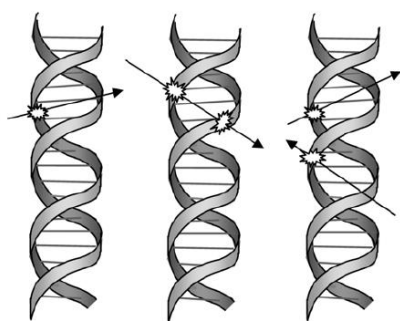


Figura 5.2: Danos causados nas moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) pela radiação ionizante (Hsieh, 2009).

Os efeitos da radiação ionizante ao nível do ADN são muito importantes nos processos desencadeantes da oncogénese, dos efeitos genéticos e hereditários. Os efeitos biológicos causados pela interação deste tipo de radiação surgem principalmente devido à interação com o material genético ou moléculas associadas, causando danos irreversíveis ou reversíveis, de acordo com a eficiência do sistema de reparação celular do indivíduo exposto (Veludo, 2011).

No entanto, o uso de radiação ionizante tem inúmeras aplicações que apresentam largos benefícios para a sociedade e para os indivíduos. Um exemplo comum é a utilização de raios X para diagnóstico em medicina através de imagem e também para fins terapêuticos – radioterapia e medicina nuclear – onde a radiação ionizante é largamente utilizada (Morais, 2015).

O princípio da utilização desta radiação ionizante é baseada numa prática justificada, ou seja, o benefício do paciente exposto à radiação tem de ser superior ao risco ou prejuízo que a prática possa causar. O princípio de aplicação de limitação das doses consiste no fato de cada indivíduo ser protegido através de limites de dose individual. Em situações de dose planejada, a dose total não deve exceder os limites fixados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (CIPR). O princípio da otimização baseia-se no acrónimo ALARA (*As Low As Reasonable Achievable*), ou seja, a dose deve ser a mais baixa possível, sem prejudicar a qualidade do exame (Mano, 2018).

5.2. Produção de Raios X

A produção de raios X dá-se quando elétrons com elevada energia interagem com a matéria, convertendo alguma da sua energia cinética em REM (Bushberg et al., 2012).

Nas ampolas de raios X, os raios X característicos e de *bremstrahlung* são produzidos quando elétrons de elevada energia colidem com o alvo (Hendee & Ritenour, 2003).

As Figuras 5.3 e 5.4 permitem melhor entender os fenómenos de geração de raios X que a seguir se descrevem:

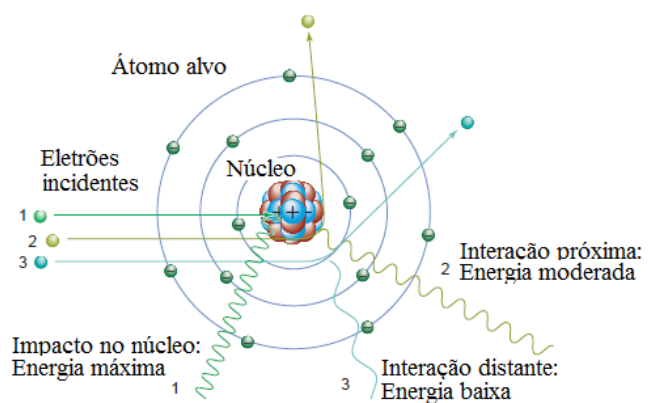
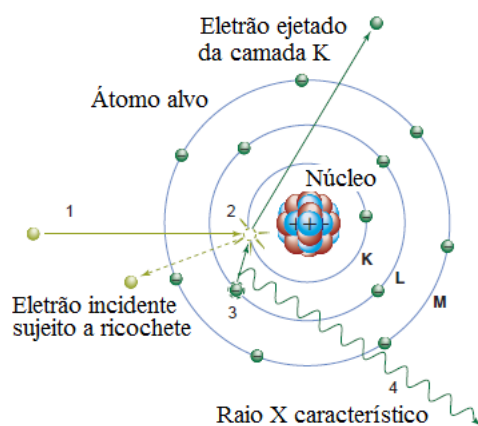


Figura 5.3: Produção de raios X característicos, adaptado de (Bushberg et al., 2012).
 Figura 5.4: Radiação de *Bremstrahlung*, adaptado de (Bushberg et al., 2012).

No momento do impacto com o alvo, a energia cinética dos elétrons é convertida noutras formas de energia, a grande maioria das interações são de colisão, neste caso as trocas de energia dos elétrons com o alvo para além de produzir raios X, simultaneamente originam energia calorífica.

A radiação característica (Figura 5.3) resulta da interação com os elétrons das camadas eletrónicas dos átomos do alvo. Os elétrons, no átomo, estão distribuídos em camadas, cada uma com uma energia de ligação dos elétrons. A camada mais interna designa-se camada K e apresenta a maior energia de ligação, seguida pela camada L, M e N, que apresentam energias de ligação progressivamente menores. As energias de ligação são “características” dos elementos químicos. Quando a energia do elétron incidente, determinado pela voltagem aplicada à ampola de raios X, excede a energia de ligação do elétron da camada do núcleo alvo, pode ejetar este elétron da sua camada, criando um vazio. Um elétron de outra camada, com menos energia de ligação, transita imediatamente de modo a preencher o vazio, e um raio x característico é emitido com uma energia igual à diferença da energia de ligação das duas camadas eletrónicas.

A produção de raios X característicos no átomo alvo ocorre na seguinte sequência:

- (1) O elétron incidente interage com o elétron da camada K através de força elétrica repulsiva.
- (2) Se o elétron da camada K for removido (apenas se energia do elétron incidente for superior à energia de ligação da camada K) deixa um vazio na camada K.
- (3) Um elétron da camada L, ou de outra camada adjacente, preenche o vazio.
- (4) É emitido um raio X característico com energia igual à diferença da energia de ligação das duas camadas.

Poderá dar-se o caso de uma pequena fração de elétrons, ao aproximar-se do núcleo sofrer a influência do seu campo positivo (Figura 5.4), as forças elétricas de *Coulomb* irão atrair e desacelerar o elétron alterando a sua trajetória, causando perda de energia cinética, que se converte em raio X de igual energia (radiação de travagem ou de *bremstrahlung*). A energia do raio X depende da distância entre o elétron e o núcleo, que diminui à medida que a distância entre estes aumenta.

A radiação de *bremstrahlung* consiste na maior parte da radiação emitida, e corresponde a um fundo contínuo de radiação. Contrariamente, os raios X característicos são picos de radiação e dão-se em determinados níveis de energia, dependendo do material em questão (Bushberg et al., 2012).

5.3. Tomografia Computorizada

Em 1973 Hounsfield ganhou o Prêmio Nobel de Física pela participação no desenvolvimento da TC. Há vários tipos de aparelhos e de gerações de TC, as suas diferenças têm a ver com a emissão dos raios X, com as características dos detectores, com o movimento da mesa e do conjunto ampoladetores. A geração de TC apresentada na Figura 5.5 é a considerada no caso de estudo.



Especificações técnicas:

- Detectores 2 x *Stellar*
- Números de cortes 2 x 128
- Tempo de rotação até 0,28 s¹⁾
- Resolução temporal de 75 ms¹⁾ independente da frequência cardíaca
- Escalões de kV - 70; 80; 100; 120; 140
- Potência de geração 200 kW (2x100)
- Resolução isotrópica 0,33 mm
- Resolução de planos 0,30 mm
- Velocidade máxima de varrimento 458 mm/s¹⁾ em *Flash* espiral
- Carga máxima da mesa 307 kg/676 lbs¹⁾
- Abertura da *Gantry* 78 cm

Figura 5.5: TC dupla fonte dupla energia – *SOMATOM Definition Flash* (Siemens Healthineers, 2018).

¹⁾Opcional

A TC é uma técnica de imagem que combina os fundamentos de radiologia convencional (Raios X) com um sistema sofisticado de computadores, que permitem formar uma imagem a partir dos sinais obtidos num conjunto de detectores sobre os quais incidem os raios X depois de atravessarem o paciente. Os raios X são produzidos por uma ampola localizada no interior do equipamento e que roda em torno do paciente, emitindo radiação na forma de um feixe colimado, conforme se visualiza na Figura 5.6.

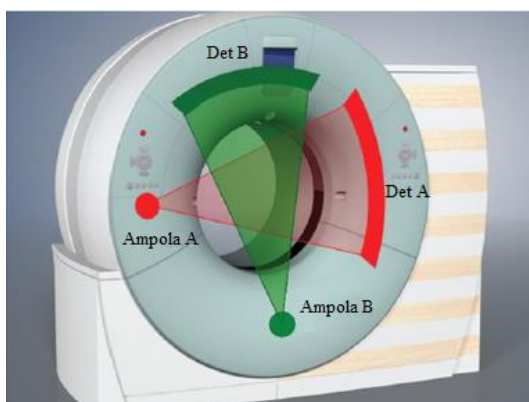


Figura 5.6: Configuração do par ampoladetector da TC de dupla fonte dupla energia

Enquanto a mesa, onde o paciente se encontra deitado, se movimenta na horizontal no interior do túnel, os detetores (dispostos em círculo e colocados diametralmente opostos à ampola) recolhem a informação resultante das diferenças de absorção da radiação pelos tecidos do corpo humano.

A imagem é reconstruída matematicamente a partir da intensidade do feixe emergente por um sistema computadorizado complexo, que processa os dados obtidos criando em seguida uma imagem em corte axial. A informação adquirida pode ser posteriormente ser processada de forma a apresentar imagens com características específicas e orientadas para um determinado objetivo diagnóstico. As reconstruções 3D são um exemplo (Penedo et al., 2013).

5.4. Princípio de funcionamento da ampola de raios X

As ampolas de raios X providenciam um ambiente ótimo para a produção de raios X característicos e de *bremstrahlung*. As ampolas contêm no seu interior um filamento, geralmente tungstênio, que quando submetido a aquecimento, liberta um feixe de eletrões que será acelerado, através da utilização de alta tensão, até um alvo. O vácuo mantido dentro do invólucro de vidro irá impedir que os eletrões interajam com as moléculas de gás.

Os raios X característicos e de *bremstrahlung*, são produzidos quando os eletrões interagem com o alvo. Antes dos raios x saírem da ampola serão submetidos a filtros, para selecionar uma escala de energia, e a colimadores, que definem o tamanho e forma do feixe, de modo a torná-lo mais preciso. Os geradores de alta tensão permitem controlar as características do feixe através da seleção da voltagem, da corrente e do tempo de exposição (Bushberg et al., 2012), (Hendee & Ritenour, 2003).

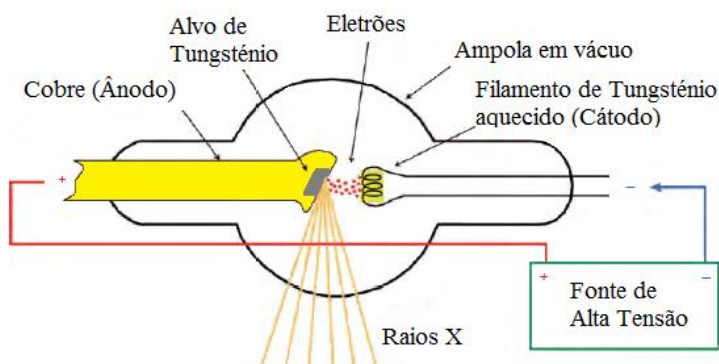


Figura 5.7: Princípio de funcionamento de uma ampola de raios X, adaptado de (Bushberg et al., 2012).

Para radiologia de diagnóstico, é aplicada uma diferença de potencial entre 20 a 150 kV entre os dois elétrodos, o cátodo e o ânodo (ver Figura 5.7). A unidade do Sistema Internacional (SI) para diferença de potencial é o *volt* (V). O cátodo é a fonte de eletrões, e o ânodo, com um potencial positivo

relativamente ao cátodo, é o alvo dos eletrões. Os eletrões são acelerados entre os dois elétrodos através da tensão aplicada e a energia cinética alcançada pelos eletrões é dada pelo produto da carga elétrica dos mesmos (q), e a diferença de potencial aplicada (V). O *joule* (J) é uma unidade demasiado grande para expressar a energia das partículas subatómicas, pelo que, na física atómica e nuclear as energias são muitas vezes expressas em termos de *eletrão volt* (eV). Um eV é igual à energia cinética ganha por um eletrão acelerado por uma diferença de potencial de $1 V$. Assim, por exemplo, a energia cinética de um eletrão acelerado por uma diferença de potencial de $50 kV$ é $50 keV$. A corrente da ampola de raios X, medida em *miliamperes* (mA), é proporcional ao número de eletrões, por segundo, que migram do cátodo para o ânodo, onde $1 mA = 6,24 \times 10^{15}$ eletrões/s (Bushberg et al., 2012).

5.5. Ampola de raios X - *Straton*®

Em 2003, a Siemens começou a utilizar na TC uma ampola de ânodo rotativo diferente e mais inovador – a ampola *Straton*. Nesta ampola, para além do ânodo rotativo a cápsula também entra em rotação, tornando-a mais inovadora relativamente aos modelos anteriores, a instalação em *chassi* e o princípio de funcionamento é visível com maior detalhe nas Figuras 5.8 e 5.9, respetivamente.

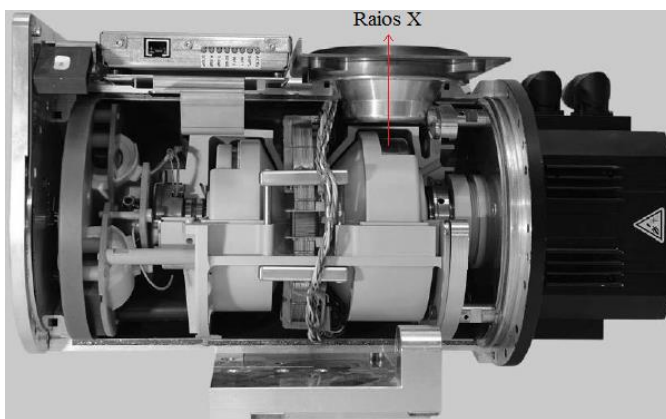


Figura 5.8: Instalação em chassi da ampola *Straton*, adaptado de (Behlig, 2016).

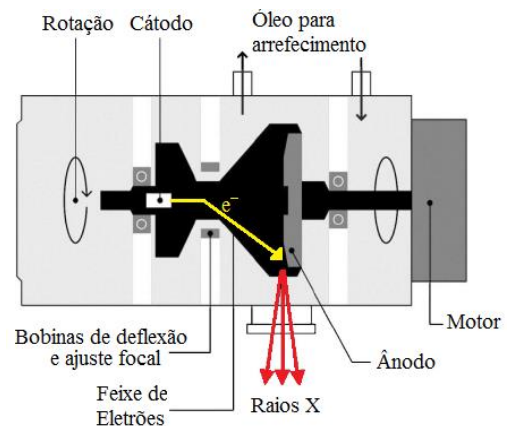


Figura 5.9: Princípio de funcionamento da ampola *Straton*, adaptado de (Schardt et al., 2004).

Através da Figura 5.10 à esquerda, visualiza-se em corte longitudinal o interior do *chassi* e da ampola de raios X. Do lado direito encontra-se a ampola de raios X desmontada do *chassi*. A ampola *Straton* tem um diâmetro de ânodo muito pequeno, sensivelmente $120 mm$, o ânodo gira solidário como parte integrante da cápsula da ampola e pelo lado exterior da cápsula, o óleo está em permanente contato. Os rolamentos da ampola funcionam através da lubrificação do óleo em vez de vácuo, e como a velocidade de rotação pode atingir os $200 Hz$ ($5 ms/rotação$), o óleo que se encontra em contato com o

exterior da cápsula, pode atingir valores extremamente elevados para dissipação do calor gerado, podendo mesmo chegar aos 50 kW térmicos, no entanto estes valores são possíveis sem que seja atingido o limite térmico dos materiais. Devido à ótima transferência de calor entre o ânodo e o óleo, a temperatura no ânodo não excede algumas centenas de graus Celsius. Como o corpo do ânodo é pequeno em diâmetro e espessura, a temperatura máxima que consegue conservar também é pequena, em magnitude é menor comparando-a com as ampolas tradicionais, no entanto apesar do tamanho compacto e do *design* económico, a potência do *Straton* é comparável às marcas concorrentes.

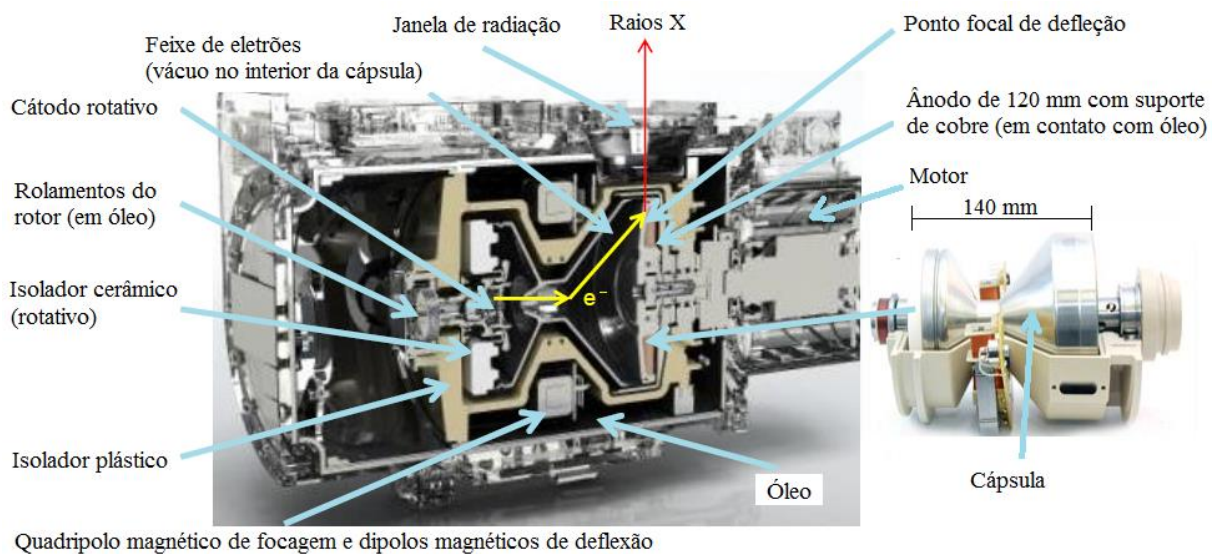


Figura 5.10: Interior do chassi e da ampola *Straton*, adaptado de (Behlig, 2016).

Relativamente ao campo elétrico necessário para acelerar os elétrons, será necessário a aplicação de uma diferença de potencial (ddp) entre o cátodo e ânodo. Tendo como referência o valor do potencial da terra (zero Volt), no ânodo aplica-se metade do valor total da ddp mas em valor negativo, no cátodo aplica-se a outra metade do valor total da ddp mas em valor positivo. Por exemplo: Considerando uma ddp de 140 kV, será aplicado no ânodo -70 kV e no cátodo +70 kV.

O isolamento de plástico que envolve a cápsula tem a funcionalidade de isolar e guiar o fluxo de óleo dentro da ampola. No cátodo (Figura 5.11) o emissor circular simétrico cria (no vácuo) uma “nuvem” de elétrons, que ao serem acelerados pela ddp serão deslocados em feixe controlado, ao longo do eixo do interior da ampola e em direção ao ânodo. O ponto focal deste feixe é fixo no ânodo (relativamente ao *chassi*) conforme se observa na Figura 5.12 (Behlig, 2016).



Figura 5.11: Detalhe do cátodo. Emissor de elétrons com 5 mm de diâmetro de Tungstênio, adaptado (Schardt et al., 2004).

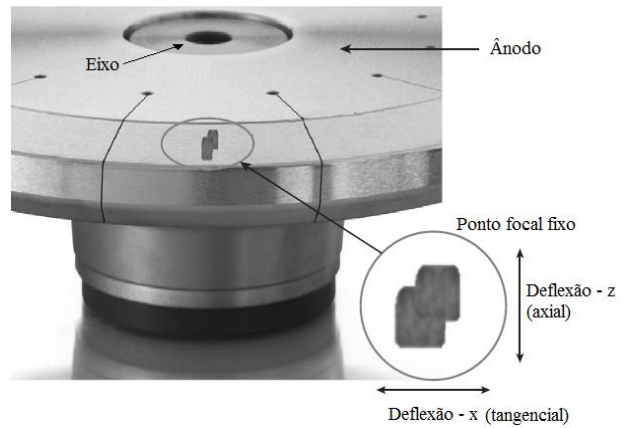


Figura 5.12: Deflexão axial e deflexão tangencial do feixe de elétrons no ânodo, adaptado (Behlig, 2016).

Este ponto focal é conseguido, mas através das deflexões criadas pelos campos magnéticos gerados pelas bobinas dos dipolos magnéticos r (deflexão axial - z) e ϕ (deflexão tangencial - x), conforme mostra a Figura 5.13, onde também se pode visualizar o quadripolo.

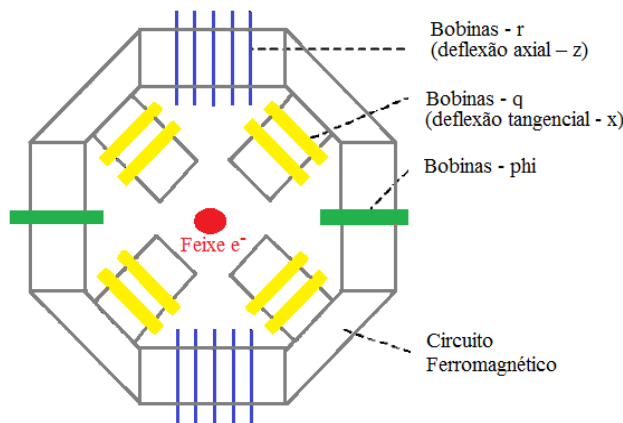


Figura 5.13: Esquema do sistema magnético de dipolos r , ϕ e quadripolo q , adaptado (Schardt et al., 2004).

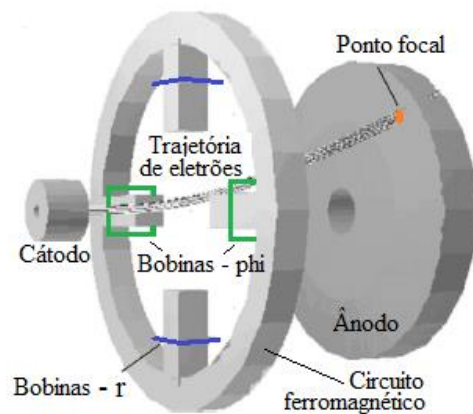


Figura 5.14: Trajetória de elétrons entre cátodo e ânodo, através dos dipolos de deflexão e quadripolo focal, adaptado (Schardt et al., 2004).

As trajetórias eletrônicas do feixe são assim defletidas neste ponto focal, perto da periferia do ânodo a cerca de 5 cm do eixo, a Figura 5.14 ilustra exatamente a descrição. Além deste controlo da trajetória através da deflexão do feixe de elétrons, o quadripolo magnético possibilita moldar o mesmo, por forma a criar pontos focais mais ou menos alongados, isto é, com dimensões e formas variáveis.

6. Caso de Estudo

Neste capítulo, trata-se de um caso de estudo aplicado em equipamentos de TC. Responde-se às sete questões da metodologia RCM através da ferramenta FMEA e do Diagrama de Decisão, identificando as melhores políticas de manutenção aos componentes que compõem estes equipamentos. Identifica-se a ampola de raios X como um componente crítico, através das consequências funcionais, económicas e de segurança. Analisa-se técnica e economicamente a viabilidade de se efetuar MPC ao componente crítico e na inviabilidade desta, a MPS em vez de MC. Recolhem-se e tratam-se dados de falha reais de sete equipamentos semelhantes, e definem-se os MDF com representação estatística para se obter a periodicidade ótima económica. Analisa-se a viabilidade económica em adquirir um sobressalente caro para *stock* e o impacto de se realizar a manutenção de oportunidade.

6.1. Enquadramento

Para a seleção do equipamento biomédico que serviu de objeto de análise para este caso de estudo, ponderaram-se vários aspetos, tendo a decisão recaído no estudo de um equipamento biomédico do setor da imagiologia, mais concretamente numa TC de dupla energia com dupla fonte, da marca *Siemens* e modelo *Somatom Definition Flash*. Os critérios determinantes para esta decisão foram:

- Equipamentos pesados de imagem médica, determinantes no apoio à decisão médica no que concerne ao rastreio, diagnóstico, intervenção e *follow up*
- Elevados custos de aquisição e de manutenção ao longo do ciclo de vida do equipamento
- Equipamento fixo com instalação específica inerente à sua utilização
- Características físicas que impliquem a existência de infraestruturas específicas e licenciadas para o seu funcionamento
- Abrangências tecnológicas de elevada complexidade técnica, composto por vários tipos de tecnologias, assim como radiação ionizante, mecânicos, térmicos, elétricos, eletrónicos, computação e transmissão de sinal
- Enorme abrangência e quantidade de prescrições médicas para realização de exames
- Exposição à radiação ionizante
- Fabricante de equipamentos de grande relevância no mercado do *Healthcare* mundial

Para este estudo, realizou-se uma visita técnica a uma UCS bastante conceituada na região de Lisboa. A visita de esclarecimento foi proporcionada pela equipa técnica da *Siemens Healthineers Portugal*, após autorização da direção técnica da respetiva UCS. Enquanto decorriam as explicações, simultaneamente realizava-se a intervenção de MPS à TC da UCS e percebeu-se a enorme complexidade e especificidade das infraestruturas, funcionamento do equipamento e dos sistemas que compõem a sala para realização de exames de TC. A Figura 6.1 permite ter uma visão geral de um sistema que compõe a sala de exames de TC.



Figura 6.1: Visão geral de uma sala de exames de TC (Siemens Healthineers, 2018).

Legenda:

- 1 – Acessórios
- 2 – TC
- 3 – Permutador de calor
- 4 – Armário de alimentação elétrica
- 5 – Sistema de reconstrução de imagem
- 6 – Mesa do doente
- 7 – Consola (computadores, teclado, rato, caixa de controlo, monitor, discos de armazenamento)

Na sala de realização de exames da UCS, foi gentilmente explicado (na generalidade) o *modus operandi* do sistema de TC, o que possibilitou ter um primeiro contato com este tipo de salas e equipamentos.

6.2. FMEA

Juntamente com uma equipa técnica especializada neste tipo de equipamentos, e já nas instalações da *Siemens Healthineers*, começou por se criar uma estrutura para posterior preenchimento da Tabela FMEA. Assim se efetuaram as divisões do equipamento em diversos níveis, nomeadamente em sistemas, subsistemas e conseqüentemente em componentes ou LRU, isto é, ao nível mais baixo. Para se realizarem as divisões nos diversos níveis até aos LRU do equipamento de TC da marca *Siemens*, modelo *Somatom Definition Flash*, os esquemas que se encontram no Anexo 1 serviram de suporte para interpretação e respetiva identificação dos diversos níveis, tornando assim possível conceber, organizar e preencher mais detalhadamente a posterior Tabela FMEA. Os diversos níveis foram estruturados e preenchidos numa Tabela para fácil interpretação, com os códigos de cada nível conforme a norma ISO 14224, para cada LRU também se preencheram os MDF, respetivamente. A estrutura da Tabela FMEA encontra-se preenchida no Anexo 2. A partir desta Tabela, consultou-se bibliografia, manuais e fichas técnicas por forma a dar seguimento ao preenchimento da Tabela FMEA que se encontra devidamente preenchida no Anexo 3.

6.3. Diagrama de decisão RCM

Para selecionar a melhor política de manutenção com base na metodologia RCM, efetuou-se para cada MDF, devidamente identificado e preenchido na Tabela FMEA (anexo 3), a correspondência conforme as orientações do diagrama de decisão RCM de Assis (2014). Os fluxogramas relativos ao diagrama de decisão RCM no ponto 3.3 (Figuras 3.3 e 3.4), e, as políticas de manutenção a adotar encontram-se no anexo 4.

Dos LRU identificados, verificou-se que a ampola de raios X era um componente crítico não reparável com algumas particularidades, o que despertou interesse e motivação em estudá-la mais detalhadamente. Justifica-se tal escolha devido à criticidade e às conseqüências que provoca tanto a nível funcional, como a nível de segurança e conseqüentemente a nível económico:

- A **nível funcional**, porque quando um dos três MDF mais incidentes se dá na ampola de raios X, o equipamento fica fora de serviço até que esta seja substituída por outra nova, pelo fato de não ser um componente reparável. Portanto o equipamento encontra-se indisponível, surgirão constrangimentos nos exames posteriores que já estavam marcados. Poderão surgir questões como, face à prescrição médica para realização deste tipo de exames, não deverão ser realizados com “alguma” urgência? O que fazer num

serviço de urgência de uma unidade hospitalar, quando surgem casos emergentes (traumas) e este equipamento encontra-se indisponível? Será funcional e aceitável levar o doente para outra sala ou piso ou até mesmo para outra UCS?

- **A nível de segurança**, no que concerne ao doente cuja imagem se obteve com artefactos (imagem com má qualidade), haverá a necessidade de repetição do exame, ou seja, irradia-lo novamente. Notar que o princípio para a utilização da radiação ionizante é baseada numa prática justificada, ou seja, o benefício do paciente exposto à radiação tem de ser superior ao risco ou prejuízo que a prática possa causar (princípio ALARA). Será que no caso de repetição de exame o benefício é maior que o prejuízo?
- **A nível económico**, evidenciam-se custos avultados, destacam-se os CO de não faturação durante o tempo de indisponibilidade (*down time*), o custo de aquisição da ampola incrementado ao pagamento de taxas de urgência de transporte e ao custo acrescido relativo ao tempo de MDO para realização da MC, em detrimento de outra política de manutenção. Estudos recentes concluem que os custos de aquisição e substituição de ampolas de raios X, ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento, chegam a ser superiores ao custo de aquisição do próprio equipamento (Oliveira, 2018). Será a política de MC economicamente a mais adequada para este componente?

Com recurso ao diagrama de decisão RCM da Figura 3.3, para o primeiro MDF percorreram-se os pontos de tomada de decisão (1, 2, 7, 8, 9) e, neste último ponto, conclui-se que a política de MPC *on-line* poderia ser possível se o equipamento estivesse dotado de sensores que permitissem medir a progressão da degradação conducente a cada MDF – o que não era o caso. As inspeções no local *off-line* também não são tecnicamente exequíveis, pois a ampola é totalmente estanque, impossibilitando o acesso ao seu interior. No entanto através de métodos indiretos, podem ser efetuadas medições no tanque de alta tensão de cada ampola de raios X (HVT_A e HVT_B), possibilitando medir o estado de degradação da ampola e evitar tempos de indisponibilidade não programados. No entanto este método implica a utilização de um *software* de algoritmos complexos, que é específico do próprio fabricante, o *Guardian Program* (Siemens Healthineers, 2018).

A utilização e aplicação deste serviço torna-se inviável, face ao custo inerente para as UCS, implicando que tal política de manutenção não seja colocada como opção. O mesmo será dizer que atualmente a MPC *off-line* é tecnicamente possível (por intermédio de medições indiretas) mas economicamente inviável, consequência disso prosseguiu-se para o ponto de tomada de decisão seguinte (10) e decidiu-se explorar a possibilidade de se intervir preventivamente em alternativa à substituição corretiva - ponto de tomada de decisão (11).

6.4. Seleção da política de manutenção para o componente crítico

Pelo facto de a MPC não ser a política de manutenção adotada, conforme explicado em 6.3, também se torna evidente que este é um componente que apresenta desgaste ao longo do seu ciclo de vida, então irremediavelmente este componente irá falhar, mas quando? Poderá abrir-se uma “janela” alternativa à política de MC, ou seja, trocar preventivamente a ampola com base nos MDF?

Face à consideração de utilizar a política de MPS, solicitaram-se dados de falhas de ampolas de raios X ao fabricante do equipamento. Os dados de falha foram gentilmente fornecidos pela *Siemens Healthineers Portugal* e correspondem a sete equipamentos do modelo *Somatom Definition Flash*. Estes equipamentos estão instalados em diversas UCS, dispersas por Portugal Continental. O primeiro equipamento considerado neste estudo corresponde ao ano de instalação de 2006 e os dois últimos equipamentos instalados dizem respeito ao ano de 2017. Para uma melhor perceção, descreve-se na Tabela 6.1 o número de equipamentos instalados e sua correspondência ao ano de instalação.

Tabela 6.1: Quantidade de TC *Siemens Somatom Definition Flash*, instaladas entre 2006 e 2017.

Ano de Instalação da TC	Nº de Equipamentos Instalados
2006	1
2007	1
2009	1
2013	1
2015	1
2017	2

6.4.1. Passo 1: Recolha de dados

Foram gentilmente cedidos os dados de MDF das duas ampolas de raios X (circuito A e circuito B), referentes a cada um das sete TC instaladas nas UCS dispersas por Portugal Continental (passo 1). Estes dados foram os possíveis e devem-se a um procedimento interno implementado pela Siemens, através do preenchimento das Ordens de Trabalho (OT) em formato de papel por parte do técnico e posteriormente inseridas em base de dados informática (SAP) por outro colega administrativo. Resumidamente, o procedimento das intervenções técnicas nas TC instaladas nas UCS, quando existem MDF no componente crítico em estudo (ampola de raios X), para além dos procedimentos de manutenção habituais ao equipamento, o registo do MDF da ampola de raios X é igualmente registado em OT. Mas no caso concreto da ampola de raios X, a identificação do MDF é efetuada com base na experiência do técnico que efetuou a análise (o verdadeiro MDF apenas será devidamente identificado

em fábrica, na Alemanha, após devolução da ampola por parte da delegação Portuguesa. No entanto, o procedimento de *feedback* após identificação do MDF verdadeiro não está implementado). Assim, foi com base na informação possível e constante na OT (cuja interpretação do MDF do componente crítico foi efetuado pelo técnico local) que se prosseguirá este estudo.

6.4.2. Passo 2: Análise preliminar de dados

Após recolha dos dados referentes aos MDF (passo 1) foram efetuados os respetivos tratamentos e ajustamentos aos mesmos (passo 2). Assim apenas três MDF das ampolas de raios X do circuito A tinham alguma representação estatística, o mesmo não se verificou nos restantes dados dos MDF deste circuito e nos dados dos MDF das ampolas de raios X do circuito B.

Os dados censurados considerados foram classificados como dados censurados à direita, pois as ampolas de raios X (após último TTF) encontravam-se a funcionar até aquele momento.

Na Tabela do Anexo 5 estão os dados dos três MDF das ampolas de raios X do circuito A de sete equipamentos, devidamente identificados, tratados e ordenados.

6.4.3. Passo 3: Seleção e validação da distribuição

Depois dos dados devidamente tratados (passo 2), surge a necessidade de determinar a distribuição de probabilidade teórica de melhor aderência aos dados empíricos de cada MDF (passo 3). Para isso deve-se primeiramente confirmar a independência dos dados, ou seja, se todos os TTF de cada componente crítico são iid. Assim concluir-se-á se a taxa de falhas é constante, ou se está a aumentar (em virtude do envelhecimento progressivo do sistema ou do aumento da severidade das condições da operação) ou a diminuir. Assim serão dispostos cronologicamente os TTF de cada componente crítico, referente a cada TC da UCS respetiva e utilizar-se para o efeito o teste de hipótese de *Laplace*, ou seja, identificar se é (ou não) um PPH.

Considere-se:

- Hipótese **nula** H_0 – Os TTF são iid (taxa de falhas constante)
- Hipótese **alternativa** H_1 – Os TTF não são iid (taxa de falhas não é constante)
- Nível de significância de 5% $\Rightarrow \alpha = 0,05$
- Recorrendo a uma Tabela da distribuição normal reduzida, $\alpha = 0,05 \Rightarrow Z_{\alpha/2} = 1,96$

O teste de *Laplace* Z_T será limitado pela última falha de cada TC, assumindo a Expressão (4.2):

$$\bullet \quad Z_T = \sqrt{12 \times (N - 1)} \times \left[\frac{\sum_1^{N-1} t_i}{(N-1) \times T_N} - 0,5 \right]$$

Sendo:

- t_i – Momento em que ocorreu a falha de ordem i
- N – Número acumulado de falhas
- T_N – Momento final do teste limitado pela última falha

Tabela 6.2: Dados de TTF's ajustados para UCS 1.

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	TTF _{acum.} (minutos)
1	01/08/2007	Arcos	839	839
1	19/01/2008	Arcos	1.164	2.004
1	25/03/2008	Filamento	533	2.536
1	17/06/2008	Arcos	349	2.885
1	20/08/2010	Ânodo ruidoso	6.922	9.807
1	24/06/2011	Ânodo ruidoso	2.748	12.555
1	16/04/2012	Arcos	2.594	15.149
1	06/02/2014	Ânodo ruidoso	6.355	21.504
1	14/08/2015	Filamento	4.992	26.495

$$|Z_T| = \sqrt{12 \times (9 - 1)} \times \left[\frac{67.279}{(9 - 1) \times 26.495} - 0,5 \right] \approx 1,79$$

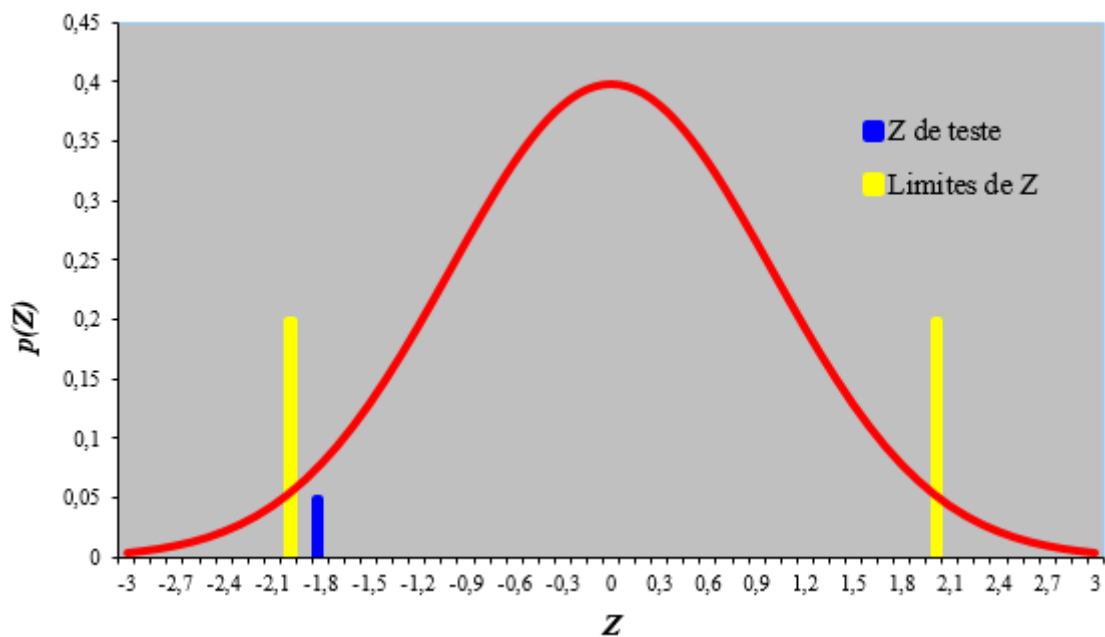


Figura 6.2: Z de teste e respectivos limites para UCS1

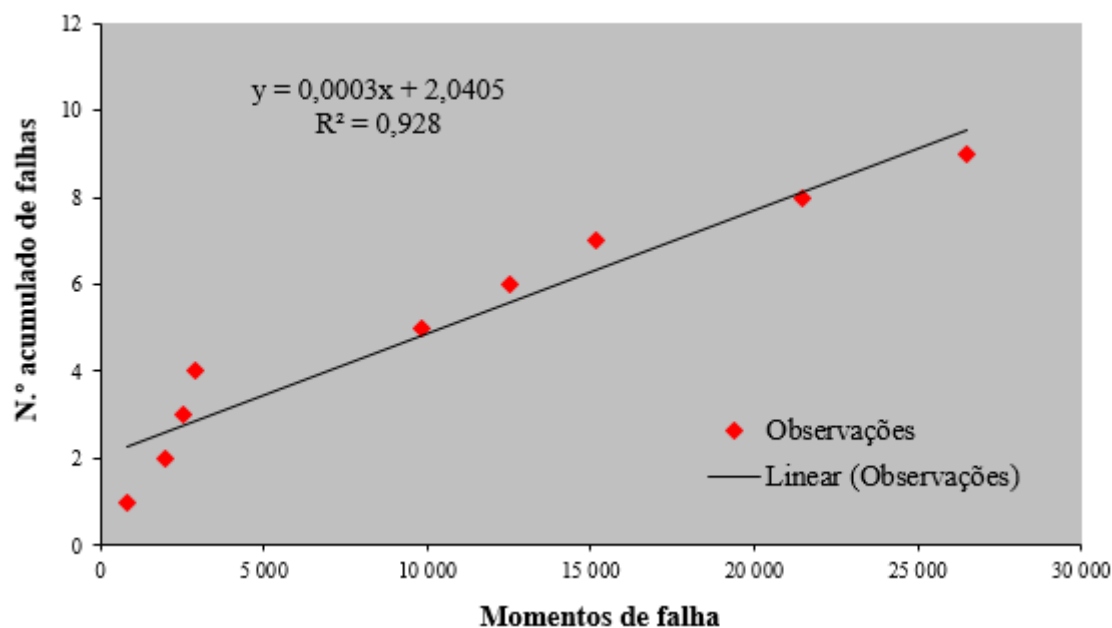


Figura 6.3: Evolução temporal das falhas para UCS1

Conclusão:

Como $|Z_T| < Z_{\alpha/2}$ ($1,79 < 1,96$), pode-se aceitar a hipótese nula H_0 , ou seja, que a taxa de falhas é (aproximadamente) constante, confirmando-se que os TTF são iid com um nível de confiança de 95%. As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram esta conclusão.

Tabela 6.3: Dados de TTF's ajustados para UCS 3.

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	TTFacum. (minutos)
3	04/08/2011	Arcos	9.169	9.169
3	19/03/2012	Arcos	2.336	11.505
3	13/03/2014	Arcos	8.296	19.801
3	17/05/2018	Filamento	10.253	30.055

$$|Z_T| = \sqrt{12 \times (4 - 1)} \times \left[\frac{40.475}{(4 - 1) \times 30.055} - 0,5 \right] \approx 0,31$$

Conclusão:

Como $|Z_T| < Z_{\alpha/2}$ ($0,31 < 1,96$), pode-se aceitar a hipótese nula H_0 , ou seja, que a taxa de falhas é (aproximadamente) constante, confirmando-se que os TTF são iid com um nível de confiança de 95%. As Figuras 6.4 e 6.5 ilustram esta conclusão.

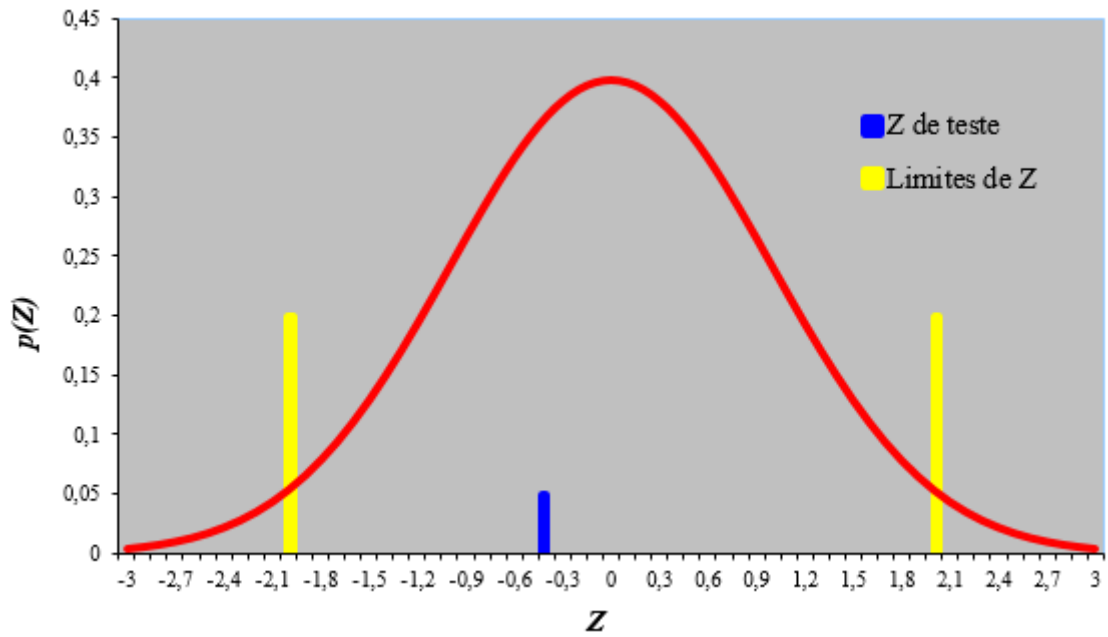


Figura 6.4: Z de teste e respectivos limites para UCS3

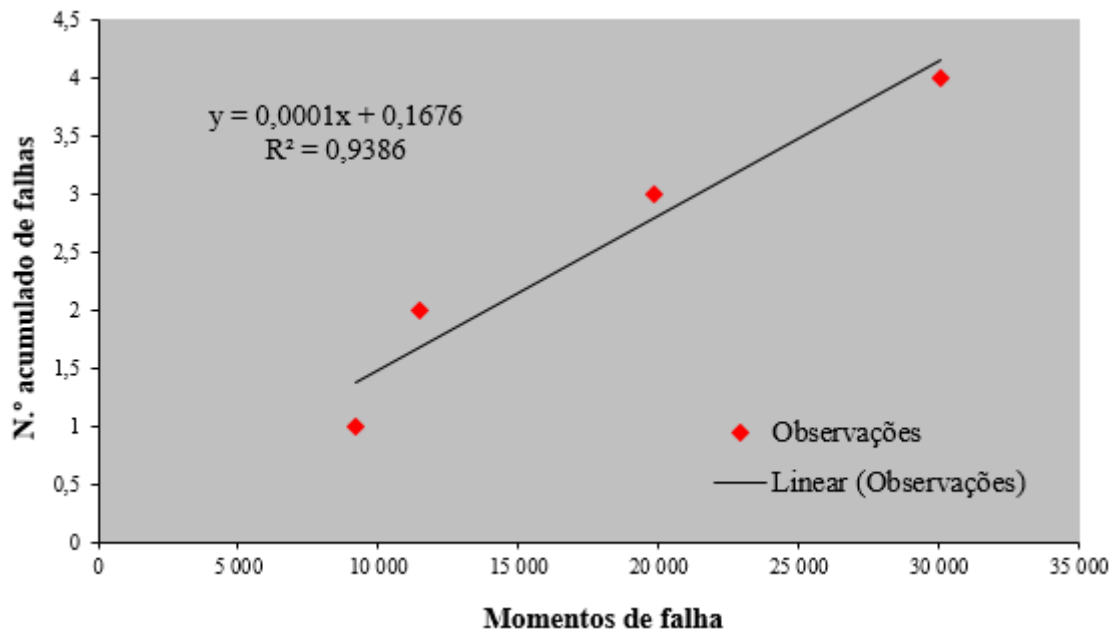


Figura 6.5: Evolução temporal das falhas para UCS3

Tabela 6.4: Dados de TTF's ajustados para UCS 4.

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	TTFacum. (minutos)
4	11/10/2010	Arcos	2.255	2.255
4	05/09/2011	Ânodo ruidoso	2.198	4.453
4	10/10/2011	Arcos	215	4.668
4	30/12/2014	Ânodo ruidoso	8.575	13.243

$$|Z_T| = \sqrt{12 \times (4 - 1)} \times \left[\frac{8.575}{(4 - 1) \times 11.375} - 0,5 \right] \approx 1,28$$

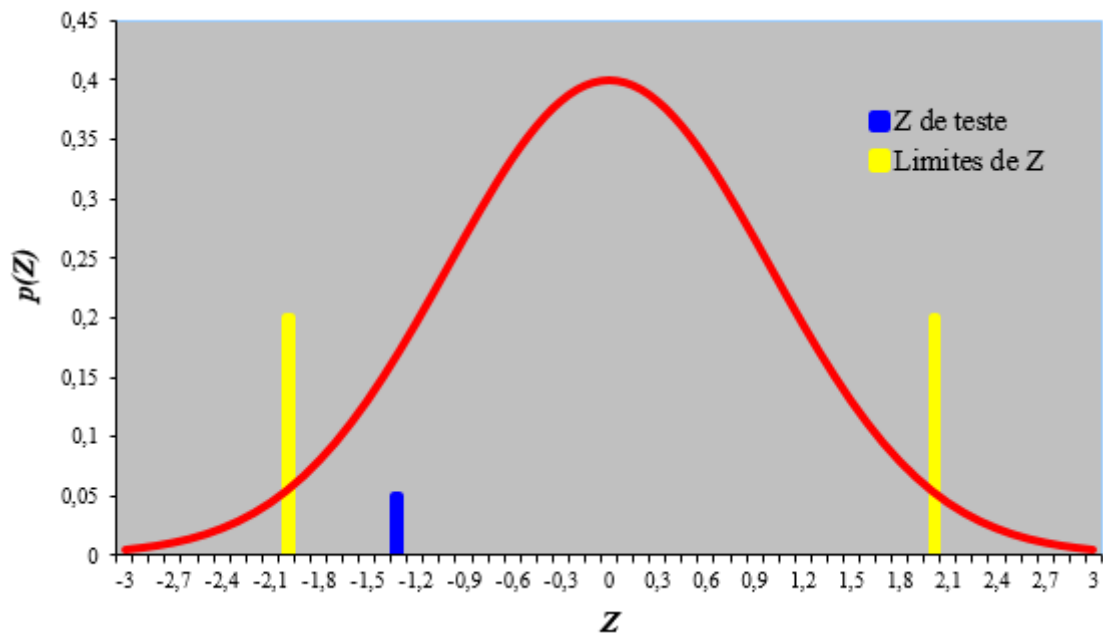


Figura 6.6: Z de teste e respetivos limites para UCS4

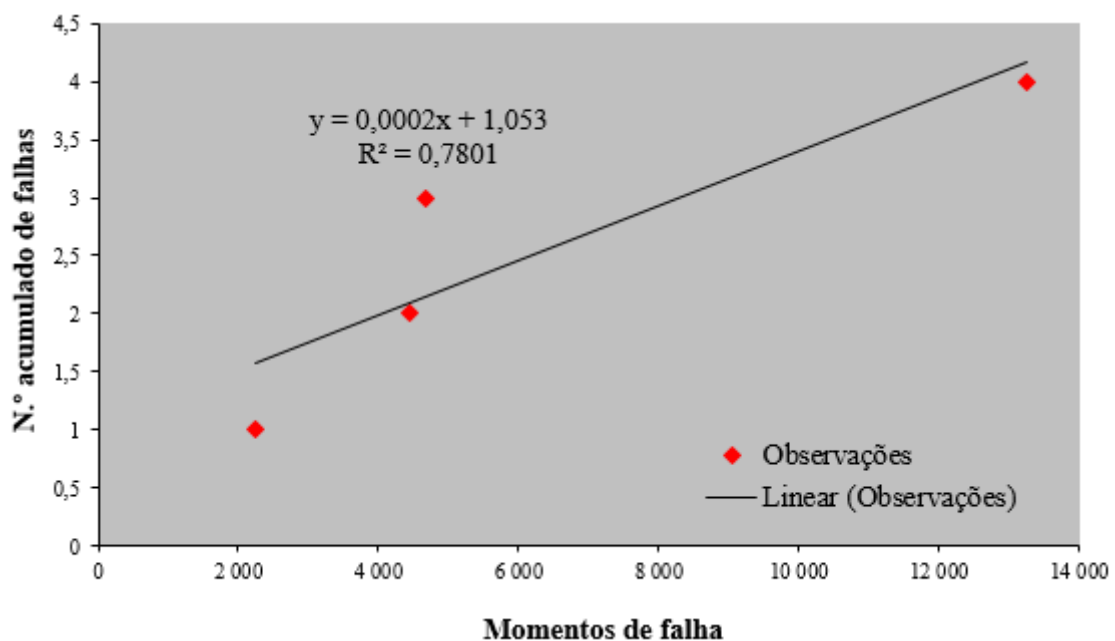


Figura 6.7: Evolução temporal das falhas para a UCS4

Conclusão:

Como $|Z_T| < Z_{\alpha/2}$ ($1,28 < 1,96$), pode-se aceitar a hipótese nula H_0 , ou seja, que a taxa de falhas é (aproximadamente) constante, confirmando-se que os TTF são iid com um nível de confiança de 95%. As Figuras 6.6 e 6.7 ilustram esta conclusão.

Tabela 6.5: Dados de TTF's ajustados para UCS 6.

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	TTF _{acum.} (minutos)
6	12/02/2016	Filamento	4.128	4.128
6	11/11/2016	Arcos	1.559	5.687
6	19/07/2018	Arcos	4.000	9.688

$$|Z_T| = \sqrt{12 \times (3 - 1)} \times \left[\frac{9.688}{(3 - 1) \times 9.816} - 0,5 \right] \approx 0,03$$

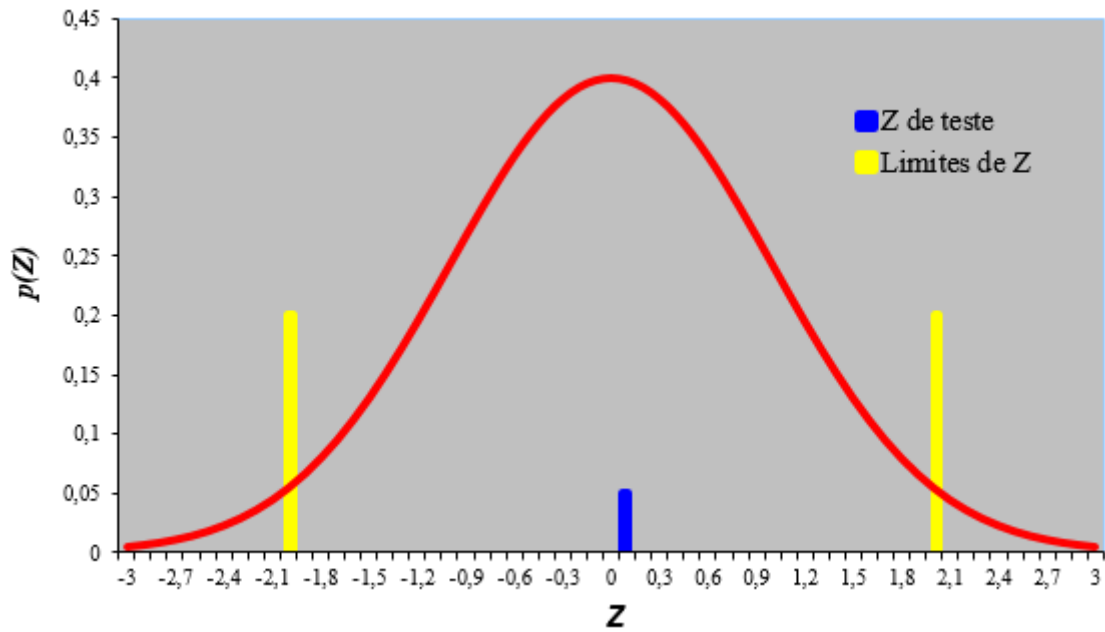


Figura 6.8: Z de teste e respectivos limites para UCS6

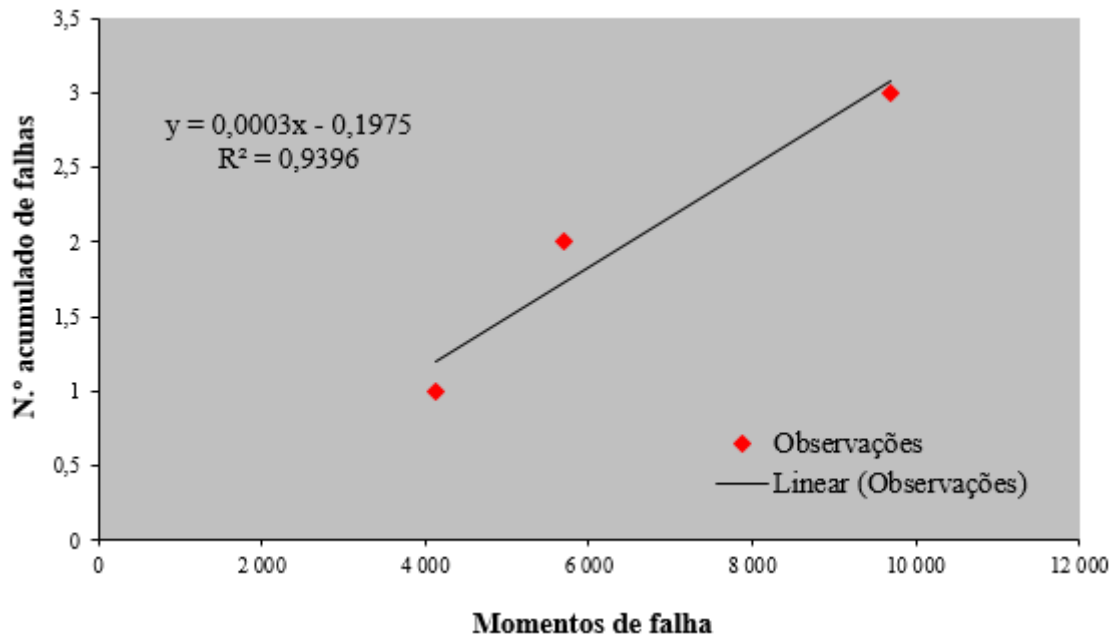


Figura 6.9: Evolução temporal das falhas para UCS6

Conclusão:

Como $|Z_T| < Z_{\alpha/2}$ ($0,03 < 1,96$), pode-se aceitar a hipótese nula H_0 , ou seja, que a taxa de falhas é (aproximadamente) constante, confirmando-se que os TTF são iid com um nível de confiança de 95%. As Figuras 6.8 e 6.9 ilustram esta conclusão.

Estando na presença de um PPH, pode-se assim determinar a respetiva distribuição teórica que melhor adere a cada MDF.

As censuras serão consideradas para os MDF1 (Tabela 6.6), MDF2 (Tabela 6.7) e MDF3 (Tabela 6.8).

Através da aplicação desenvolvida por Assis (2014) em EXCEL e do *software* da *ReliaSoft Weibull++/ALTRA PRO*, gentilmente cedido pelo ISEL para este efeito, obtiveram-se as distribuições de probabilidade teóricas que melhor aderem aos dados.

As Figuras representadas são as geradas pelo *software* da *ReliaSoft* e estão representadas para os MDF1 (Figura 6.10), MDF2 (Figura 6.11) e MDF3 (Figura 6.12).

Tabela 6.6: Dados de TTF relativamente ao MDF1

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	Censuras	Notas
1	01/08/2007	Arcos	839	-	-
1	19/01/2008	Arcos	1.164	-	-
1	17/06/2008	Arcos	349	-	-
1	16/04/2012	Arcos	2.594	-	-
1	28/08/2018	Censurar	8.205	S	Atual
2	07/05/2018	Arcos	4.289	-	-
2	29/08/2018	Censurar	514	S	Atual
3	04/08/2011	Arcos	9.169	-	-
3	19/03/2012	Arcos	2.336	-	-
3	13/03/2014	Arcos	8.296	-	-
3	28/08/2018	Censurar	400	S	Atual
4	11/10/2010	Arcos	2.255	-	-
4	10/10/2011	Arcos	215	-	-
4	28/08/2018	Censurar	11.097	S	Atual
5	29/08/2018	Censurar	878	S	Atual
6	11/11/2016	Arcos	1.559	-	-
6	19/07/2018	Arcos	4.000	-	-
6	29/08/2018	Censurar	247	S	Atual
7	29/08/2018	Censurar	197	S	Atual

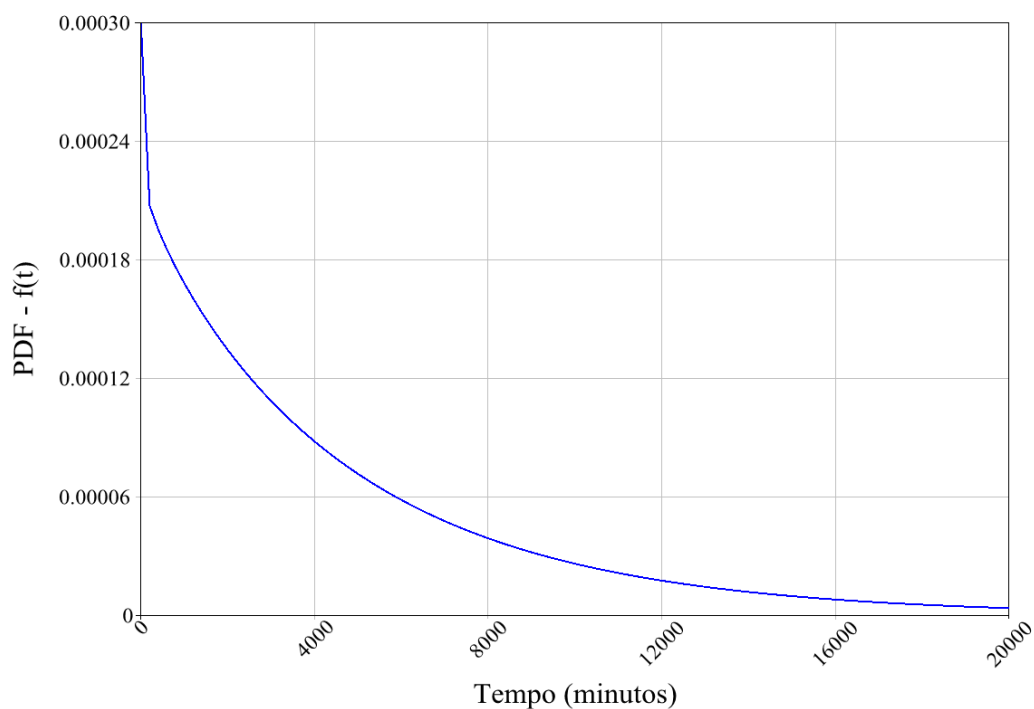


Figura 6.10: Distribuição teórica de *Weibull* (2P) do MDF1

Tabela 6.7: Dados de TTF relativamente aos MDF2

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	Censuras	Notas
1	25/03/2008	Filamento	533	-	-
1	14/08/2015	Filamento	4.992	-	-
1	28/08/2018	Censurar	8.205	S	Atual
2	29/08/2018	Censurar	514	S	Atual
3	17/05/2018	Filamento	10.253	-	-
3	28/08/2018	Censurar	400	S	Atual
4	28/08/2018	Censurar	11.097	S	Atual
5	11/06/2018	Filamento	4.395	-	-
5	29/08/2018	Censurar	878	S	Atual
6	12/02/2016	Filamento	4.128	-	-
6	29/08/2018	Censurar	247	S	Atual
7	29/08/2018	Censurar	197	S	Atual

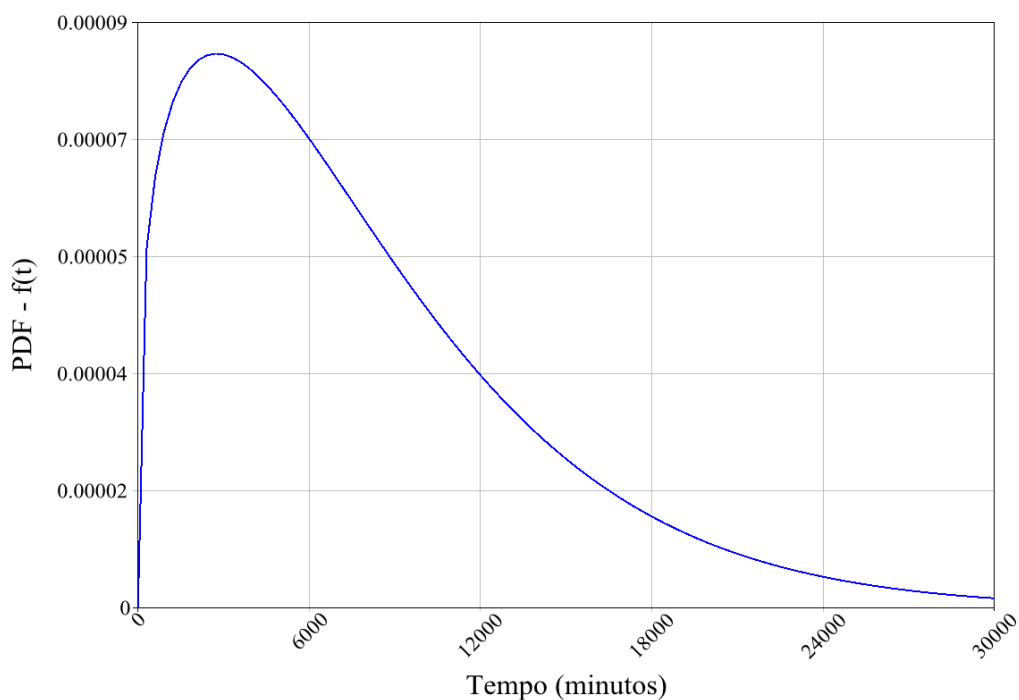


Figura 6.11: Distribuição teórica de *Weibull* (2P) do MDF2

Tabela 6.8: Dados de TTF relativamente aos MDF3

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	Censuras	Notas
1	20/08/2010	Ânodo ruidoso	6.922	-	-
1	24/06/2011	Ânodo ruidoso	2.748	-	-
1	06/02/2014	Ânodo ruidoso	6.355	-	-
1	28/08/2018	Censurar	8.205	S	Atual
2	29/08/2018	Censurar	514	S	Atual
3	28/08/2018	Censurar	400	S	Atual
4	05/09/2011	Ânodo ruidoso	2.198	-	-
4	30/12/2014	Ânodo ruidoso	8575	-	-
4	28/08/2018	Censurar	11.097	S	Atual
5	29/08/2018	Censurar	878	S	Atual
6	29/08/2018	Censurar	247	S	Atual
7	29/08/2018	Censurar	197	S	Atual

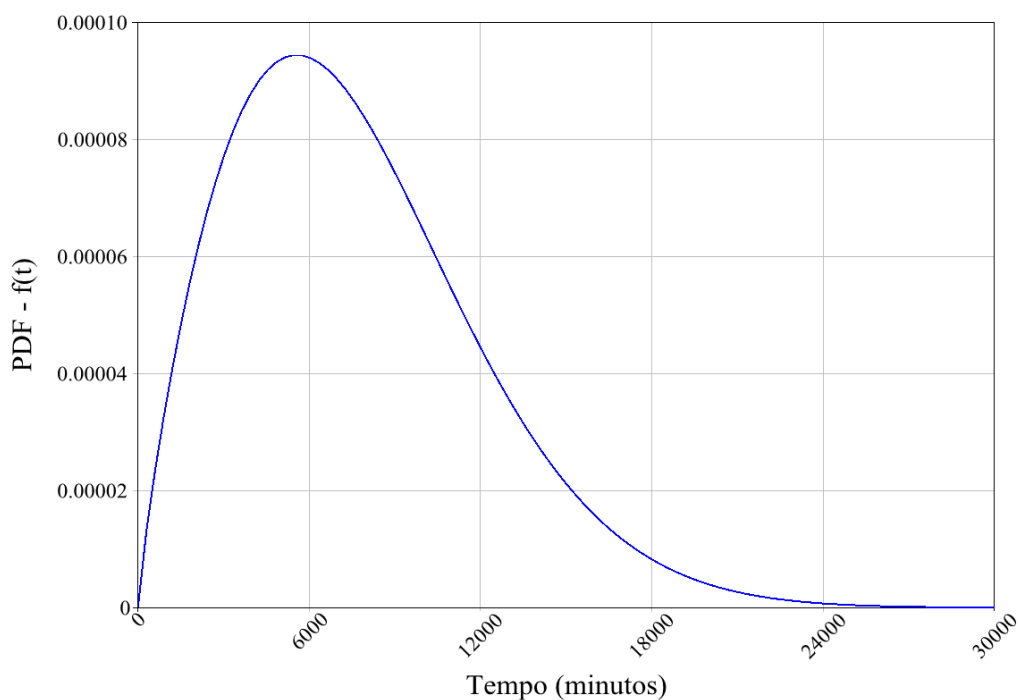


Figura 6.12: Distribuição teórica de *Weibull* (2P) do MDF3

6.4.4. Passo 4: Estimação dos parâmetros da distribuição

A estimação dos parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) da distribuição de *Weibull* de melhor aderência (passo 4) do MDF1 (Tabela 6.9), MDF2 (Tabela 6.10) e do MDF3 (Tabela 6.11), serão calculados pelos métodos de regressão linear (mínimos quadrados) e de máxima verosimilhança.

Ressalva-se a utilização dos dois métodos e simultaneamente dos dois *softwares*, para uma melhor interpretação dos resultados.

Tabela 6.9: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF1.

MDF 1	Método Regressão	Máxima Verosimilhança	Software
Forma	0,84	0,97	Assis (2014)
α	0,87	0,97	<i>ReliaSoft</i>
Escala	4.584	4.873	Assis (2014)
β (min)	4.559	4.873	<i>ReliaSoft</i>
Localização	112	-	Assis (2014)
t_0 (min)	90	-	<i>ReliaSoft</i>

Tabela 6.10: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF2.

MDF 2	Método Regressão	Máxima Verossimilhança	Software
Forma	0,79	1,32	Assis (2014)
α	0,80	1,29	ReliaSoft
Escala	11.577	8.616	Assis (2014)
β (min)	11.548	8.640	ReliaSoft
Localização	-	-	Assis (2014)
t_0 (min)	-	-	ReliaSoft

Tabela 6.11: Parâmetros de localização (t_0), forma (α) e escala (β) do MDF3.

MDF 3	Método Regressão	Máxima Verossimilhança	Software
Forma	1,32	1,83	Assis (2014)
α	1,54	1,83	ReliaSoft
Escala	8.821	8.589	Assis (2014)
β (min)	8.444	8.589	ReliaSoft
Localização	196	-	Assis (2014)
t_0 (min)			ReliaSoft

Constatam-se valores de parâmetros um pouco diferentes entre os dois métodos, justificando-se pela existência de poucos dados disponíveis e ainda pela existência de alguns dados censurados. Nestas situações, o método da máxima verossimilhança deve ser preferido. Também se verifica que os valores dos parâmetros de forma nos três MDF são bastante próximos à unidade, sendo mesmo inferior à unidade no caso do MDF1. Este facto revela-nos que as falhas têm um comportamento aproximadamente casual, o que não nos parece razoável pois trata-se de um componente que se degrada, o que é incompatível com aqueles resultados. Este comportamento de falha casual (sem memória) descrito pela curva de distribuição Exponencial negativa (Figura 6.10) pode dever-se à reduzida quantidade de dados disponibilizados (TTF verdadeiros e TTF censurados). Poderá dever-se também ao facto de existirem formas distintas de exploração das diversas TC, isto é, diferentes quantidades de dose (mAs) e energia (keV) para aquisição de imagem, cadências entre exames, número de exames por dia e também influências externas ambientais (temperatura de bolbo seco e humidade relativa).

Assim, decidiu-se consultar o corpo de engenharia da *Siemens Healthineers* com a expectativa de obtenção de uma razão explicativa. A razão escutada foi de encontro ao presumido por nós. Para eles, este componente está sujeito sem margem de dúvidas a degradação, e, tais parâmetros não vão ao encontro do que efetivamente se verifica na realidade, desta forma tendo em conta a física da falha e por analogia, entendeu-se efetuar um ajuste de tais parâmetros de modo a descrever (o melhor possível) o comportamento real de cada MDF.

Para prosseguimento deste caso de estudo, redefiniram-se os parâmetros ajustados (aqueles que se supõem corresponderem mais à realidade), indo ao encontro de alguma bibliografia consultada, os quais se mostram na Tabela 6.12.

Tabela 6.12: Parâmetros da distribuição de *Weibull* para os MDF1, MDF2 e MDF3

Parâmetros	MDF1	MDF2	MDF3
α	3,6	2,8	1,7
β (min)	3.400	5.600	6.100
t_0 (min)	0	0	0

Sendo a ampola um LRU com mais de um MDF, facilmente se percebe que os MDF irão ocorrer conforme o tempo de utilização, mas podem surgir questões como:

- Qual o MDF que se irá declarar primeiro?
- Poderá considerar-se apenas o MDF predominante, isto é, com o menor MTTF e desprezar os restantes MDF para definir a periodicidade mais económica?
- A fiabilidade deste componente poderá ser calculada como se de um sistema de fiabilidade série de três componentes se tratasse?
- Deverão estes MDFC ser analisados simultaneamente?

Para dar resposta a estas questões, no ponto 6.4.5 apresenta-se uma solução que simula o comportamento temporal dos MDFC.

6.4.5. Modos de Falha Concorrentes ou Competitivos

Para se poder simular os TTF dos três MDF da ampola, foi desenvolvido um modelo em EXCEL de simulação numérica de Monte-Carlo representando o funcionamento do componente, podendo falhar por qualquer um dos três MDF (o que se declarar primeiro), de modo a apurar a fiabilidade e o custo da política de MPS para cada alternativa da periodicidade de substituição e seleccionar a mais económica, através de uma análise de sensibilidade.

As características operacionais que alimentaram o modelo desenvolvido apresentam-se na Tabela 6.13, e tiveram em consideração uma estrutura de custos dependendo da intervenção a realizar, sendo ela corretiva ou preventiva.

Intervenção através de MC:

Quando uma ampola de uma TC falha e é alvo de uma intervenção corretiva, o tempo durante o qual a TC fica parada – MDT – reparte-se normalmente em 6 parcelas:

1. O tempo de comunicação da falha aos SMI e posteriormente à equipa técnica especializada (normalmente de uma empresa externa);
2. O tempo da equipa técnica especializada efetuar o diagnóstico à TC, sendo identificada nessa deslocação a anomalia (falha da ampola) e decidir-se o que fazer para repor o normal funcionamento;
3. O tempo que os SMI levam para agendar a intervenção, o qual inclui a encomenda da ampola ao armazém;
4. O tempo a aguardar pela ampola quando esta não existe em armazém e têm de ser encomendada ao exterior;
5. O tempo de intervenção de modo a colocar a TC nas condições normais de funcionamento;
6. O tempo de comissionamento (teste de bom funcionamento na presença do cliente interno).

O custo da prestação do serviço de MC é normalmente calculado pela soma dos tempos 2, 5 e 6 multiplicados pelo custo da Secção Homogénea (frequentemente um Centro de Custo) em €/hora.

O CO pode ser calculado de duas formas:

1. A TC não tem substituta, o que inviabiliza a possibilidade de desviar a “produção” para outra TC equivalente. Neste caso, o CO é igual à soma de todos os tempos “faturáveis” entre dois momentos, ou seja, entre o momento em que o equipamento já se encontra recuperado (em condições normais de funcionamento) e o momento em que o componente falhou, multiplicado pelo preço da unidade de venda (de cada exame) e pela quantidade de exames possíveis de realizar nesse período. O custo de uma paragem será igual à soma do CO, calculado conforme descrito anteriormente, somado ao custo da prestação do serviço de MC, calculado conforme descrito acima.
2. A TC tem substituta. Neste caso, o CO praticamente não existe e o custo de uma paragem é igual apenas ao custo da prestação do serviço de MC, calculado conforme descrito acima.

Intervenção através de MPS:

Quando a TC é sujeita a uma intervenção de MPS, existem duas possibilidades, sendo elas a existência ou não de uma TC alternativa:

1. No caso de existir uma TC alternativa, a “produção” é desviada e não “perdida” e o custo de uma paragem é apenas o custo da intervenção de MPS calculado pelo tempo de intervenção efetiva (normalmente muito inferior ao de uma intervenção corretiva) multiplicado pelo seu

custo hora (preço do Centro de Custo). Este cálculo também se torna válido na situação em que se consiga efetuar a intervenção de MPS num horário ou dia que não interfira com a “produção” ou ainda poder-se distribuir a realização dos exames para outros dias sem criar constrangimentos.

- No caso de não existir alternativa e ter que se efetuar a intervenção de MPS num horário ou dia que interfira com a “produção”, existe de facto um CO, embora não tão grande quanto no caso da consequência de uma falha.

Tabela 6.13: Características operacionais consideradas

Capacidade	4	Exames / hora
Regime	12	Horas / dia
	286	Dias / ano
Margem de contribuição	120	€ / Exame
Custo da ampola	130.000	€
MTTR _(MC)	12	Horas / MC
MTTR _(MPS)	8	Horas / MPS
MDT	60	Horas
Custo de MDO	180	€ / Hora

Onde:

Capacidade – Quantidade média de exames possíveis de realizar numa hora

Regime – Tempo de realização de exames na UCS

Margem de contribuição – Diferença entre o preço de venda e o custo variável do exame

Custo do componente – Valor de aquisição da ampola colocada na UCS

MTTR_(MC) – Intervalo de tempo médio para realização da MC

MTTR_(MPS) – Intervalo de tempo médio para realização da MPS

MDT – MTTR_(MC) + ALDT

Custo de MDO – Valor hora do técnico externo (subcontratado)

Para o caso de estudo, consideraram-se para:

Custo de MC:

$$(Custo\ do\ Comp.) + (Custo\ MDO \times Tempo\ MC) + (Cap. \times M. Contrib. \times downtime) \quad (6.1)$$

Substituindo valores, obtem-se:

$$130.000\ € + 180\ €/hora \times 12\ horas + 4\ Exames/hora \times 120\ € \times 60\ horas$$

$$Custo\ MC = 160.960\ €$$

Custo de MPS:

$$(Custo\ do\ Comp.) + (Custo\ MDO \times Tempo\ MPS) \tag{6.2}$$

Substituindo valores, obtem-se:

$$130.000\ € + 180\ €/hora \times 8\ horas$$

$$Custo\ MPS = 131.440\ €$$

A Figura 6.13 mostra o exemplo de uma iteração no simulador desenvolvido com o propósito de se encontrar a periodicidade ótima económica para o caso de estudo, recorrendo a um método numérico de “tentativa-erro”.

Este simulador divide-se em quatro zonas:

- Superior esquerda: Preenchimento dos parâmetros (localização, forma e escala) dos MDFC da ampola.
- Superior centro: Preenchimento dos dados relativos a custos e tempos associados.
- Superior direita: Geração de resultados de tempos médios, custos de manutenção, fiabilidade e disponibilidade.
- Inferior esquerda: Geração de TTF simulados para cada MDFC, através da função **aleatório()** ou **rand()** do EXCEL.
- Inferior direita: Resultados de cada corrida com base no menor TTF dos MDFC.

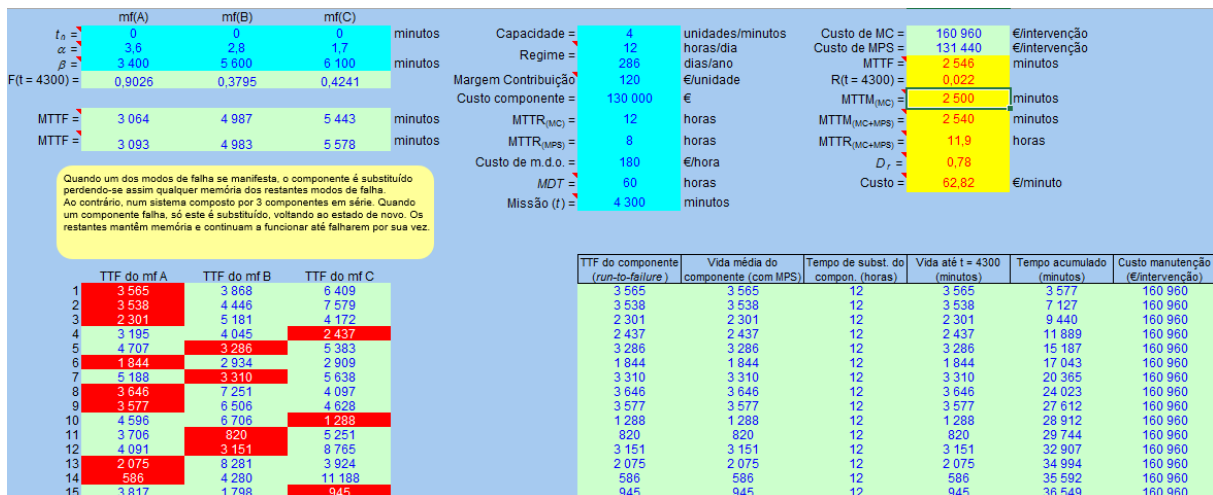


Figura 6.13: Exemplo de uma iteração do simulador MDPC

Assim, após introdução dos valores conforme Tabela 6.13 correu-se o modelo de simulação para cada periodicidade alternativa um número de vezes (frequentemente da ordem de centenas ou mesmo milhares - neste caso 1000 vezes) até que o erro amostral do valor esperado da variável em análise atingisse valores que se consideram aceitáveis ($\epsilon < 1\%$). O resultado do tratamento em frequência dos

TTF concorrentes e do teste de aderência de KS estão representados nas Figuras 6.14 e 6.15 respectivamente.

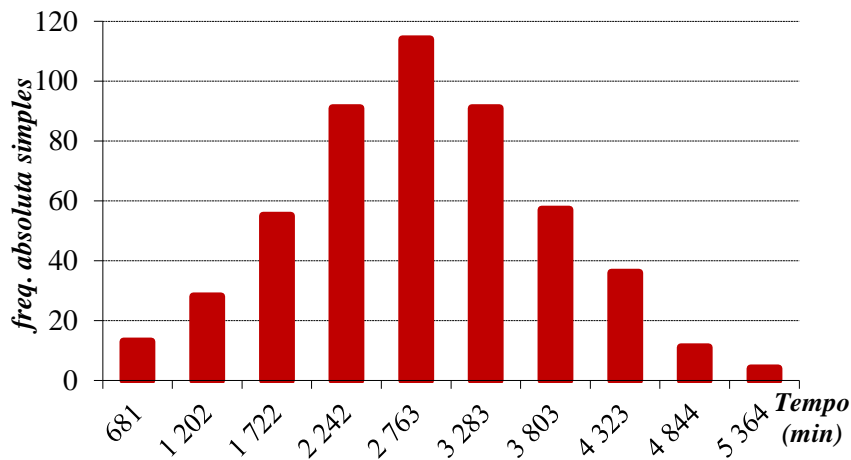


Figura 6.14: Distribuição em frequência dos TTF no conjunto dos três MDF

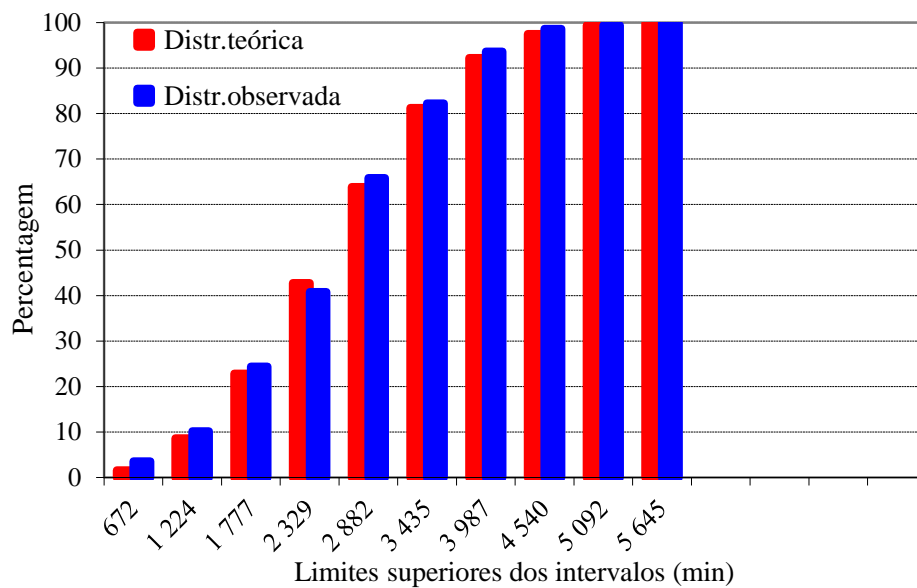


Figura 6.15: Distribuição de frequências relativas acumuladas no conjunto dos três MDF

O teste de aderência de KS aplicado aos 500 TTF do componente (no conjunto dos três MDF) obtidos em algumas corridas, denuncia um comportamento em falha segundo uma distribuição de probabilidade de *Weibull* de parâmetros: **Localização** = 0 minutos; **Forma** $\cong 2,78$; **Escala** $\cong 3.172$ minutos, para um nível de significância de 5%.

Este resultado torna viável a adoção de uma política MPS, podendo assim prosseguir para a uma análise de sensibilidade que se demonstra na Tabela 6.14.

Tabela 6.14: Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade

Missão (min)	Custo (€/min)	Fiabilidade	Acréscimo ao custo mínimo (%)
3.600	63,08	0,15	0,24%
3.700	62,97	0,12	0,06%
3.800	62,94	0,10	0,02%
3.900	63,00	0,08	0,11%
4.000	62,98	0,07	0,08%
4.100	62,96	0,06	0,04%
4.200	63,07	0,04	0,22%
4.300	62,93	0,04	0,00%
4.400	63,01	0,03	0,13%
4.500	63,02	0,02	0,14%

Conclusão: A periodicidade ótima económica acontece aos 4.300 minutos de radiação. A MPS só terá lugar aproximadamente 4 vezes em cada 100 intervenções.

Nesta situação, constata-se que a periodicidade ótima económica de MPS seria tal, que a fiabilidade resultaria muito baixa, o que significaria que uma ação de MPS dificilmente teria lugar.

Este resultado deve-se ao elevado custo de ambos os tipos de intervenção (MPS e MC) pela via do material. O que se compreende, pois quanto mais caro este é, tanto mais económico se torna atrasar a intervenção de MPS, o que provoca o aumento da probabilidade de falha, com a consequente intervenção de MC.

Generalização: No caso de um componente com valor de aquisição elevado como o considerado até aqui, não restam dúvidas de que a MPS se torna praticamente inviável, substituí-la após falhar – *run-to-failure* – será economicamente a opção mais vantajosa.

Todavia, o princípio de que a política de MPS pode ser adotada no caso de um dispositivo que apresente MDFC é válido, desde que o custo de uma intervenção corretiva seja maior do que a de uma intervenção preventiva numa proporção significativa e o custo de aquisição do componente crítico seja moderado (a confirmar em cada caso específico). Assim se justifica pela suposição a seguir descrita, isto é, mantendo todas as características operacionais até aqui consideradas, alterando apenas o custo da ampola para uma valorização moderada de 10.000€:

Custo de MC:

Substituindo valores na Expressão 6.1, obtem-se:

$$10.000 \text{ €} + 180 \text{ €/hora} \times 12 \text{ horas} + 4 \text{ Exames/hora} \times 120 \text{ €} \times 60 \text{ horas}$$

$$\text{Custo MC} = 40.960 \text{ €}$$

Custo de MPS:

Substituindo valores na Expressão 6.2, obtem-se:

$$10.000 \text{ €} + 180 \text{ €/hora} \times 8 \text{ horas}$$

$$\text{Custo MPS} = 11.440 \text{ €}$$

Tabela 6.15: Características operacionais consideradas com custo moderado da ampola

Capacidade	4	Exames / hora
Regime	12	Horas / dia
	286	Dias / ano
Margem de contribuição	120	€ / Exame
Custo da ampola	10.000	€
MTTR _(MC)	12	Horas / MC
MTTR _(MPS)	8	Horas / MPS
MDT	60	Horas
Custo de MDO	180	€ / Hora

Assim, após nova introdução dos valores conforme Tabela 6.15 correu-se o modelo de simulação para cada periodicidade alternativa um número de vezes (neste caso 1000 vezes) até que o erro amostral do valor esperado da variável em análise atingisse valores que se consideram aceitáveis.

Tabela 6.16: Análise de sensibilidade do custo a variações da periodicidade

Missão (min)	Custo (€/min)	Fiabilidade	Acréscimo ao custo mínimo (%)
1200	12,14	0,91	10,61%
1300	11,74	0,89	7,01%
1400	11,43	0,87	4,17%
1500	11,18	0,84	1,87%
1600	11,05	0,82	0,66%
1700	10,97	0,79	0,00%
1800	10,98	0,76	0,05%
1900	11,02	0,73	0,38%
2000	11,10	0,70	1,14%
2100	11,26	0,67	2,63%

Pode-se assim visualizar graficamente o custo da manutenção em função da periodicidade de MPS através da Figura 6.16, e, analisar o resultado da melhor periodicidade ótima económica pela análise de sensibilidade da Tabela 6.16.

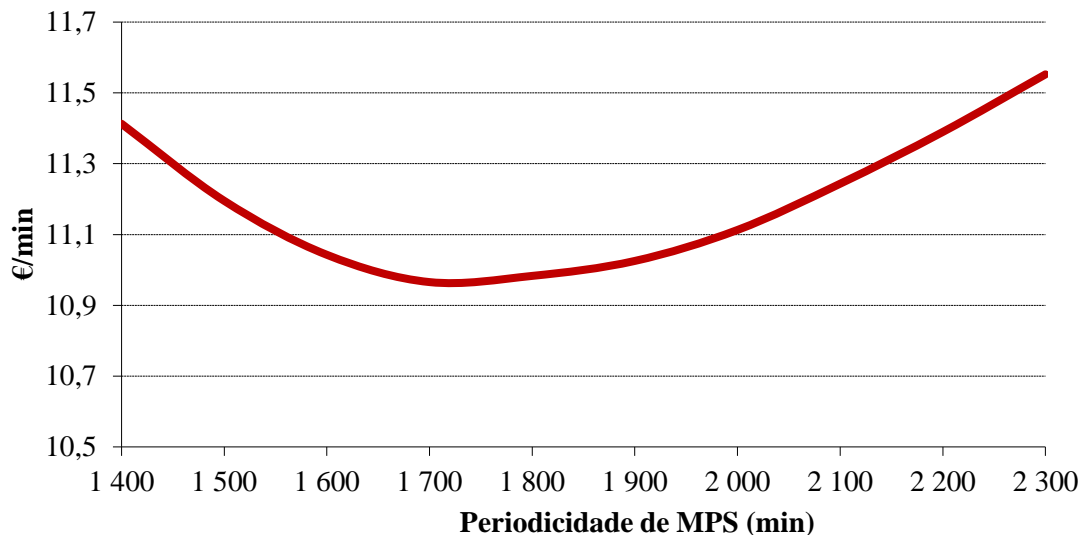


Figura 6.16: Custo de manutenção em função da periodicidade de MPS

Conclusão: Neste caso, alterando o componente crítico para um valor de aquisição moderado (10.000 €), a periodicidade ótima económica encontra-se aos 1.700 minutos de funcionamento.

A MPS terá lugar aproximadamente 8 vezes em cada 10 intervenções, o que torna esta uma situação bastante realista. Assim, tendo em conta o custo de aquisição do componente (custo moderado) a política de MPS pode ser considerada uma vantajosa opção.

Esta conclusão pode estender-se a qualquer modelo, comportando qualquer número de MDFC e/ou quaisquer dados (tendo sempre em atenção o referido anteriormente).

Com base na periodicidade ótima económica da ampola (1.700 minutos), pondera-se estudar a viabilidade económica de se criar *stock* do componente – este é geralmente um dilema com o qual as empresas se deparam na decisão de adquirir ou não componentes de substituição antecipadamente.

Facilmente se percebe que para uma fiabilidade ótima, neste caso $\cong 80\%$, pode adquirir-se a ampola tendo em consideração o tempo de aprovisionamento de forma a não comprometer a MPS – através do algoritmo de programação *Materials Requirement Planning* (MRP), ou seja JIT, no entanto independentemente dos SMI das UCS optarem por substituir a ampola na periodicidade ótima

económica, no ponto 6.4.6 avalia-se economicamente o custo da aquisição de um sobressalente para *stock*.

MDF Predominante Versus MDF Concorrentes

Muitas vezes, estando na presença de componentes que apresentam mais de um MDF, como no caso de estudo, os gestores de ativos (ou responsáveis de manutenção) por uma questão de facilidade de raciocínio de cálculo ou mesmo desconhecimento na abordagem desta temática, cometem erradamente a decisão em definir os tempos de MPS, assumindo como premissas estando na presença de um sistema de fiabilidade série, ou consideram apenas o MDF Predominante desprezando os restantes (Assis & Ribeiro, 2018).

1º caso - MDF em série:

- Pode-se verificar na Figura 6.17 uma forma de abordar a primeira premissa considerada, o componente (ampola) não sendo reparável, quando falha por qualquer um dos MDF será substituído por outro novo, independentemente se foi devido ao MDF1, 2 ou 3. Facilmente se verifica que a fiabilidade do componente será novamente reposta e equiparada à de fábrica (intrínseca), pois trata-se de um componente novo. Por outras palavras, nestas situações os MDF não guardam memória.

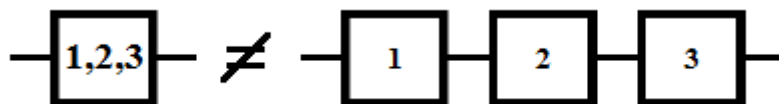


Figura 6.17: Comparação entre um componente com três MDF e um sistema série

Já num sistema composto por três componentes não reparáveis, quando um deles falha, apenas esse componente será substituído voltando ao estado de novo. Os outros dois componentes partem para nova missão guardando em memória o seu estado de degradação, até que sejam substituídos por outros novos.

2º caso – MDF Predominante:

- Considere-se apenas o MDF predominante desprezando os outros dois. A análise das periodicidades de MPS e custos associados terão em consideração os três MDF do caso de estudo. Como se pode verificar, a frequência de falhas entre os MDF2 e 3 são sensivelmente distintas e inferiores comparativamente ao MDF Predominante (MDF1). Nesta situação, através de uma análise de sensibilidade entre MDFC e MDF Predominante, constata-se o seguinte na Tabela 6.17: Considerando os três MDFC do caso de estudo:

- Periodicidade ótima económica = 1.700 minutos
- Custo de MPS = 10,97 €/minuto

Considerando apenas o MDF Predominante do caso de estudo:

- Periodicidade ótima económica = 2.000 minutos
- Custo de MPS = 11,11 €/minuto

Tabela 6.17: Análise de sensibilidade entre os três MDF e o MDF Predominante

Incremento =	100			Acréscimo ao custo mínimo (%)
	Missão (t)	Custo (€/min)	Fiabilidade	
Começando com:	1400	11,41	0,87	4,08%
	1500	11,20	0,84	2,09%
	1600	11,04	0,82	0,70%
	1700	10,97	0,79	0,00%
	1800	10,98	0,76	0,16%
	1900	11,03	0,73	0,54%
	2000	11,11	0,70	1,34%
	2100	11,24	0,67	2,53%
	2200	11,39	0,63	3,87%
	2300	11,55	0,60	5,35%
Conclusão = A periodicidade ótima é 1700				

Para o caso de estudo, quando um dos MDF do componente apresenta um MTTF sensivelmente inferior aos restantes, o critério de escolher o MDF Predominante para base do cálculo da periodicidade ótima económica de MPS, em lugar de considerar todos os MDF atuantes, conduz a um custo de manutenção ligeiramente superior e, logo, desprezável.

- Considere-se agora a hipótese dos três MDFC terem taxas de falha muito semelhantes (no limite iguais ao MDF1) e calcula-se os custos da política de manutenção considerando a ação simultânea dos três MDF e a ação de apenas o MDF predominante. Após a realização de uma análise de sensibilidade constata-se o seguinte na Tabela 6.18:

Considerando os três MDFC iguais (parâmetros do MDF2 e 3 = MDF1):

- Periodicidade ótima económica = 1.400 minutos
- Custo de MPS = 10,81 €/minuto

Considerando o MDF Predominante:

- Periodicidade ótima económica = 2.000 minutos
- Custo de MPS = 11,96 €/minuto

Tabela 6.18: Análise de sensibilidade entre os três MDF idênticos e o MDF Predominante

Incremento =	100			Acréscimo ao custo mínimo (%)
	Missão (t)	Custo (€/min)	Fiabilidade	
Começando com:	1200	11,30	0,93	4,54%
	1300	11,00	0,91	1,78%
	1400	10,81	0,88	0,00%
	1500	10,82	0,85	0,13%
	1600	10,86	0,82	0,50%
	1700	11,04	0,78	2,10%
	1800	11,28	0,74	4,39%
	1900	11,61	0,69	7,42%
	2000	11,96	0,64	10,66%
	2100	12,44	0,59	15,07%

Conclusão = A periodicidade ótima é 1400

Para o caso de estudo, demonstrou-se que a alternativa de considerar os três MDFC é mais económica do que a alternativa de considerar apenas o MDF predominante. Logo, a análise considerando todos os MDF é aconselhada.

Pode-se generalizar e concluir que, quando os MDFC de um mesmo componente ocorrem com frequências muito próximas, o critério de escolher o MDF predominante para base de cálculo da periodicidade ótima económica conduz a um custo de manutenção superior ao que se obteria se se considerasse o resultado da ação conjunta de todos os MDF do componente. Logo, a análise considerando todos os MDF atuantes é aconselhada.

6.4.6. Sobressalente do componente crítico

No caso do componente crítico não ser reparável, de apresentar uma taxa de falhas reduzida (da ordem de uma unidade em dois, três ou mais anos), de estas apresentarem consequências funcionais, de segurança e económicas (devidamente descritas em 6.3), dependendo da periodicidade de MPS eleita, pode acontecer que o componente falhe (mais ou menos vezes) antes da data planeada para a sua substituição preventiva. Nesta situação, e se não existir um sobressalente em *stock*, os CO, decorrentes do tempo que medeia entre a sua encomenda ao fornecedor e a sua disponibilidade, podem ser muito elevados.

Por estes motivos, torna-se necessária uma análise económica prévia para avaliar a hipótese de manter permanentemente uma unidade em *stock* até ao fim da vida útil do equipamento de TC. Recorrendo ao EXCEL, desenvolveu-se um simulador para dois cenários alternativos: Manutenção ou não de um sobressalente em *stock*. Mais especificamente:

7. Sobressalente SIM (SS) – Adquirir um sobressalente para *stock*. Pelo facto do componente crítico ter características de atravancamento reduzido, considera-se que o mesmo fique sob a responsabilidade dos SMI da UCS (em vez de um prestador externo).

Para o caso em estudo, considera-se que, para além do investimento que se segue a cada intervenção de manutenção – umas vezes preventiva, outras vezes corretiva – os custos podem ser os seguintes:

- Quando a substituição é corretiva, o custo resultante é igual à soma do custo da MDO dos SMI e do CO devido a receitas perdidas durante $MTTR_{(MC)}$.

- Quando a substituição é preventiva, o custo é apenas a MDO dos SMI durante $MTTR_{(MPS)}$ pois a intervenção foi planeada.

A estes custos serão acrescidos os custos de armazenagem durante o período de vida útil (restante) do equipamento.

8. Sobressalente NÃO (SN) – Não adquirir sobressalente para *stock*. O sobressalente só é adquirido no seguimento de uma falha – incorrendo em CO elevados – ou JIT, isto é, com a antecedência do prazo de aprovisionamento em relação à data planeada para a sua substituição planeada (algoritmo MRP pode ser uma solução viável).

Para o caso em estudo, considera-se que, para além do investimento que se segue a cada intervenção de manutenção – umas vezes preventiva, outras vezes corretiva – os custos podem ser os seguintes:

- Quando a substituição é corretiva, o custo resultante é igual à soma do custo da MDO dos SMI durante $MTTR_{(MC)}$ e do CO devido a receitas perdidas durante o período: Prazo de aprovisionamento + $MTTR_{(MC)}$, o mesmo será dizer o custo resultante durante todo o tempo de inatividade do equipamento, MDT.

- Quando a substituição é preventiva, o custo é apenas a MDO dos SMI durante $MTTR_{(MPS)}$, pois a intervenção foi planeada e o sobressalente foi adquirido JIT e portanto existe em armazém ou é enviada diretamente para o cliente ou local de instalação / necessidade.

Para se obterem os parâmetros equivalentes do componente no que se refere ao comportamento à falha, partindo do simulador dos MDFC (ponto 6.4.5), colheram-se 500 TTF admitindo uma periodicidade de MPS tão elevada que jamais haveria lugar a uma intervenção de MPS. Assim, analisando o comportamento em falha da ampola, determinaram-se os parâmetros de forma, escala e

localização que melhor descrevem a distribuição de probabilidade teórica de melhor aderência aos TTF daqueles três MDFC. Submeteram-se estes dados de falha gerados aleatoriamente numa corrida do simulador ao teste de hipótese de KS a uma distribuição teórica de *Weibull* e constatou-se a existência de aderência significativa com os seguintes parâmetros:

Forma $\alpha = 2,74$;

Escala $\beta = 2.854$ minutos;

Localização $t_0 = 0$ minutos

Estes parâmetros são os utilizados no simulador desenvolvido para esta dissertação que será seguidamente explicado.

A Figura 6.18 ilustra um exemplo de uma iteração do simulador para apoio à decisão na aquisição de sobressalentes.

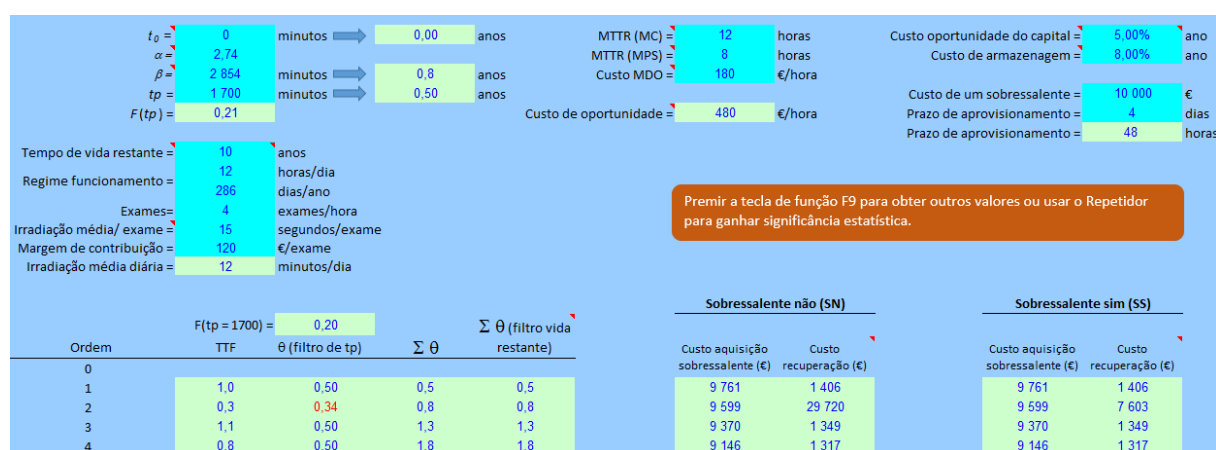


Figura 6.18: Simulador Sobressalentes com os dados introduzidos

Para o caso de estudo, torna-se necessário saber qual o tempo de irradiação médio por exame da ampola e o tempo de calendário que correspondem os 1.700 minutos de funcionamento da ampola – idealmente um contador de tempo de funcionamento da ampola poderia dar esta informação aos SMI e com base nisso tomarem-se as respetivas considerações – no entanto, na ausência desta informação e em alternativa recorreu-se à experiência de dois profissionais de manutenção e um técnico radiologista com mais de 10 anos de experiência em TC.

Esta abordagem empírica foi alvo de reflexão e troca de conhecimentos, pois vários protocolos de exames com diferentes tempos de aquisição são constantemente postos em prática.

Tabela 6.19: Características operacionais consideradas

Tempo de vida restante	10 anos
Regime funcionamento	12 horas/dia
	286 dias/ano
Exames	4 exames/hora
Irradiação média / exame	15 segundos/exame
Margem de contribuição	120 €
Irradiação média diária	12 minutos/dia
MTTR _(MC)	12 horas
MTTR _(MPS)	8 horas
Custo MDO	180 €/hora
CO	480 €/hora
CO do capital	5,0% ano
Custo de armazenagem	8,0% ano
Custo de um sobressalente	10.000 €
Prazo de aprovisionamento	4 dias

Onde:

Tempo de vida restante – Tempo de vida do equipamento ao qual a ampola pertence

Regime funcionamento – Tempo de realização de exames na UCS

Exames – Quantidade média de exames realizados no período de uma hora

Irradiação média / exame – Tempo médio de funcionamento da ampola por exame

Margem de contribuição – Diferença entre o preço de venda e o custo variável por exame

MTTR_(MC) – Tempo médio para intervenção corretiva

MTTR_(MPS) – Tempo médio para intervenção preventiva

Custo MDO – Custo hora dos técnicos de manutenção

CO do capital – Custo respeitante ao imobilizado no armazém

Custo de armazenagem – Custo despendido anualmente para armazenagem do sobressalente

Custo de um sobressalente – Custo de aquisição da ampola

Prazo de aprovisionamento – Tempo previsto entre o momento em que se constata a necessidade do sobressalente e o momento da sua chegada e disponibilidade para montagem.

Havendo exames cujas aquisições tenham a duração de poucos segundos e outros a duração de várias dezenas considerou-se para este caso de estudo, um valor médio de irradiação por exame de 15 segundos.

A irradiação média diária corresponde ao tempo médio de funcionamento da ampola por dia em [minutos/dia] pode ser calculada pela seguinte Expressão 6.3:

$$Irrad.média\ diária = \frac{(Regime\ funcion.) \times (Exames) \times (Irrad.média/exame)}{60} \quad (6.3)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$Irrad.média\ diária = \frac{12 [horas/dia] \times 4 [exames/hora] \times 15 [segundos/exame]}{60}$$

$$Irradiação\ média\ diária = 12 [minutos/dia]$$

O tempo de missão da ampola (t_p), isto é, os 1.700 minutos referentes ao tempo de funcionamento após o qual acontece uma MPS, irão corresponder ao seguinte tempo de calendário em [anos]:

$$t_p = \frac{t_p [tempo\ de\ irradiação\ para\ MPS]}{Regime\ func. [dias/ano] \times Irradiação\ média\ diária [minutos/dia]} \quad (6.4)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$t_p = \frac{1700 [minutos]}{286 [dias/ano] \times 12 [minutos/dia]}$$

$$t_p \cong 0,5 [anos]$$

O CO por cada hora de paragem do equipamento equivale ao período de não faturação devido à indisponibilidade da TC em [€/hora].

$$\text{Custo de oportunidade} = (Exames) \times (Margem\ de\ contribuição) \quad (6.5)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$\text{Custo de oportunidade} = 4 [Exames/hora] \times 120 [€/exame]$$

$$\text{Custo de oportunidade} = 480 [€/hora]$$

No que concerne ao tempo de vida útil das TC, com base nas três regras de ouro da *European Coordination Committee of the Radiological, Electromedical and Healthcare IT Industry* (COCIR), considerou-se para este caso de estudo a segunda regra, isto é, limitar a utilização destes equipamentos em 10 anos, evitando atrasos e obsolescências tecnológicas.

Assim, após introdução dos valores no simulador conforme Tabela 6.19 e Figura 6.18, correu-se o modelo para cada TTF gerado até que fosse atingido o valor temporal de vida restante (10 anos).

Obtiveram-se assim dois *cash-flows* de custos previsionais (a preços de hoje ou constantes) – um correspondente à alternativa SS e outro correspondente à alternativa SN, ambos considerando os

investimentos na substituição das ampolas falhadas, os CO, os custos de intervenção dos SMI e os custos de armazenagem – este último só no caso da alternativa SS. Como as duas alternativas SS e SN partilham o mesmo horizonte temporal, elege-se o valor presente (P) como critério para decisão após os *cash-flows* descontados.

Os fatores de conversão financeira a usar são os seguintes (Assis, 2014):

- Valor presente de um capital futuro, pela Expressão 6.6:

$$P = F \cdot \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (6.6)$$

- Valor presente de um conjunto de rendas iguais, pela Expressão 6.7:

$$P = A \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] \quad (6.7)$$

Onde:

P - Valor atual do capital

F - Valor futuro do capital P no fim de qualquer período

A - Renda no fim de cada período

i - Taxa de juro por período

n - Número de períodos de capitalização

Ordem	F(tp = 1700) = 0,20		Σ θ	Σ θ (filtro vida restante)	Sobressalente não (SN)		Sobressalente sim (SS)	
	TTF	θ (filtro de tp)			Custo aquisição sobressalente (€)	Custo recuperação (€)	Custo aquisição sobressalente (€)	Custo recuperação (€)
0								
1	0,6	0,50	0,5	0,5	9 761	1 406	9 761	1 406
2	0,7	0,50	1,0	1,0	9 528	1 372	9 528	1 372
3	0,6	0,50	1,5	1,5	9 301	1 339	9 301	1 339
4	0,8	0,50	2,0	2,0	9 079	1 307	9 079	1 307
5	0,5	0,50	2,5	2,5	8 862	27 436	8 862	7 019
6	0,8	0,50	3,0	3,0	8 650	1 246	8 650	1 246
7	0,6	0,50	3,5	3,5	8 444	1 216	8 444	1 216
8	1,0	0,50	4,0	4,0	8 242	1 187	8 242	1 187
9	0,9	0,50	4,5	4,5	8 045	1 159	8 045	1 159
10	0,2	0,22	4,7	4,7	7 960	24 645	7 960	6 304
11	0,5	0,50	5,2	5,2	7 770	1 119	7 770	1 119
12	0,7	0,50	5,7	5,7	7 585	1 092	7 585	1 092
13	1,0	0,50	6,2	6,2	7 403	1 066	7 403	1 066
14	0,7	0,50	6,7	6,7	7 227	1 041	7 227	1 041
15	1,2	0,50	7,2	7,2	7 054	1 016	7 054	1 016
16	1,2	0,50	7,6	7,6	6 886	992	6 886	992
17	0,9	0,50	8,1	8,1	6 721	968	6 721	968
18	0,4	0,35	8,5	8,5	6 607	20 454	6 607	5 233
19	1,0	0,50	9,0	9,0	6 449	929	6 449	929
20	0,4	0,41	9,4	9,4	6 321	19 571	6 321	5 007
21	0,4	0,40	9,8	9,8	6 198	19 190	6 198	4 909
22	0,8	0,50	10,3	-	-	-	-	-
23	0,7	0,50	10,8	-	-	-	-	-
24	1,6	0,50	11,3	-	-	-	-	-
25	1,3	0,50	11,8	-	-	-	-	-

Custo total atual (SN) = 293 840 €

Custo atual = 221 020 €

Custo atual de armazenagem = 6 177 €

Custo total atual (SS) = 227 200 €

Conclusão = Manter permanentemente um sobressalente é mais económico 22,7%

Figura 6.19: Exemplo de uma iteração do Simulador Sobressalentes

Na Figura 6.19 exemplifica-se uma iteração do simulador Sobressalentes, cuja programação em EXCEL é sustentada pelas equações posteriormente descritas.

Os TTF são gerados aleatoriamente através da Expressão 2.7, onde:

$$TTF = t_0 + \beta \times \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \text{aleatório}()} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

$\sum \theta$ (filtro de vida restante) é o somatório dos intervalos de tempo de funcionamento até ser efetuada a substituição da ampola (preventiva ou corretivamente) e durante a vida restante estimada do equipamento ao qual a ampola pertence, a qual são 10 anos neste caso de estudo.

O custo atual de aquisição do sobressalente pode ser calculado através da Expressão 6.8:

$$\text{Custo atual aquisição}[\text{€}] = \frac{\text{Custo do sobressalente}}{(1 + \text{Custo oport. capital} [\%])^{\sum \theta}} \quad (6.8)$$

Quando se substitui a ampola por MPS, o custo atual de recuperação pode ser dado pela Expressão 6.9:

$$\text{Custo atual recup.} [\text{€}] = \frac{\text{Custo de MDO} [\text{€/hora}] \times \text{MTTR}_{(MPS)} [\text{horas}]}{(1 + \text{Custo oport. capital} [\%])^{\sum \theta}} \quad (6.9)$$

Na alternativa SN, quando se substitui a ampola através de MC o custo atual de recuperação pode ser calculado pela Expressão 6.10:

$$\text{Custo atual recup.} [\text{€}] = \frac{\text{Custo MDO} \times \text{MTTR}_{(MC)} + \text{Custo de oport.} \times (\text{MTTR}_{(MC)} + \text{Prazo aprov.})}{(1 + \text{Custo oport. capital} [\%])^{\sum \theta}} \quad (6.10)$$

Na alternativa SS, quando se substitui a ampola através de MC o custo atual de recuperação pode ser calculado pela Expressão 6.11:

$$\text{Custo atual recup.} [\text{€}] = \frac{\text{MTTR}_{(MC)} \times (\text{Custo MDO} + \text{Custo de oport.})}{(1 + \text{Custo oport. capital} [\%])^{\sum \theta}} \quad (6.11)$$

Nesta alternativa, uma ampola será adquirida inicialmente para armazém e uma nova (sobressalente) cada vez que seja necessária a sua substituição. O serviço de armazenagem comporta um custo anual calculável pela seguinte Expressão 6.12:

$$C. \text{ Atual Armaz.} = C. \text{ Sobr.} \times C. \text{ Armaz.} (\%) \times \left[\frac{(1 + C. \text{ Oport. Capital})^{\text{tempo vida rest.}} - 1}{C. \text{ Oport. Cap.} \times (1 + C. \text{ Oport. Cap.})^{\text{tempo vida rest.}}} \right] \quad (6.12)$$

Com base nas Expressões 6.8, 6.9 e 6.10 existem condições de se poder calcular o Custo Total Atual para a alternativa SN – Expressão 6.13. Com base nas Expressões 6.8, 6.11 e 6.12, existem condições de se poder calcular o Custo Total Atual para a alternativa SS – Expressão 6.14:

$$C.Total\ Atual\ (SN)[\text{€}] = \sum_0^{\text{tempo vida rest.}} \text{Custo Atual Aquisição} + \sum_0^{\text{tempo vida rest.}} \text{Custo Atual Recup.} \quad (6.13)$$

$$C.Total\ Atual\ (SS) = \sum_0^{\text{tempo vida rest.}} C.Atual\ Aquis. + \sum_0^{\text{tempo vida rest.}} C.Atual\ Recup. + C.Atual\ Armaz. \quad (6.14)$$

Com base na iteração da Figura 6.19, conclui-se que manter permanentemente um sobressalente em *stock* é mais económico 22,7%. No entanto, ao efetuarem-se várias corridas do simulador (pressionando de cada vez a tecla F9), facilmente se conclui que o resultado tende muitas vezes para a alternativa SS mas também menos vezes para a alternativa SN. Convirá pois determinar a probabilidade de cada um dos cenários se vir a concretizar. Só assim é possível tomar uma decisão devidamente fundamentada. Com efeito, não basta decidir pela alternativa que aparenta ser a melhor, é importante calcular a probabilidade (“risco”) de uma qualquer decisão vir a revelar-se afinal a pior. Com efeito, tendo em conta que muitas das variáveis que integram um qualquer cenário apresentam um comportamento aleatório, uma decisão deve sempre basear-se não apenas na rentabilidade ou eficiência esperada, mas também no “risco” de uma decisão vir a revelar-se afinal a pior, se esta probabilidade for elevada, devem ser providenciadas medidas de contingência.

Para se calcular aquela probabilidade (“risco”), foram realizadas 1000 corridas do modelo de simulação e obtiveram-se os seguintes resultados para um erro amostral relativo $\varepsilon < 5\%$:

- A alternativa SS foi a melhor em 965 corridas;
- A alternativa SN foi a melhor em 35 corridas.

$$\text{Probabilidade de inversão do resultado} = \frac{35}{35 + 965} = 0,035$$

Conclusão:

Está-se agora em condições de se concluir que manter permanentemente um sobressalente em *stock* (SS) é mais económico do que não o fazer (SN) e que a probabilidade da alternativa SS ser a mais económica é 0,965 e que a probabilidade de não o ser é 0,035.

Caso o “risco” do investimento fosse mais expressivo, poder-se-ia eventualmente optar mesmo assim pela alternativa de manutenção de um sobressalente em *stock* (SS) e negociar com o fabricante a

sua devolução em qualquer momento em que se constatasse, após novas corridas do simulador com dados atualizados, não ser mais rentável mantê-lo em *stock* durante a vida então restante do equipamento ao qual o componente sobressalente pertence.

6.4.7. Manutenção de Oportunidade

Aproveitar a oportunidade de paragem de um equipamento para antecipar ou não a substituição preventiva de um componente, pode trazer benefícios e vantagens económicas que devem ser mensuradas. Só assim se pode analisar e ponderar devidamente o benefício em avançar com a manutenção de oportunidade ou não.

Suponha-se que, no caso de estudo, acabou de acontecer uma paragem de uma TC. Em resultado do diagnóstico, constata-se a necessidade de proceder a uma intervenção de MC com o objetivo de substituir a ampola que se encontra em falha (MDF1).

Ao observar o plano de trabalhos nos próximos meses, o planeador (ou preparador de trabalho) notou que as escovas da *gantry* deverão ser substituídas dentro de 30 dias (calendário), pelo que se questionou se não seria mais económico antecipar a substituição destas escovas, aproveitando a circunstância da paragem para substituição da ampola. Para decidir, reuniu toda a informação que considerou relevante sobre as escovas:

- Comportamento em falha segundo uma distribuição de probabilidade *Weibull* com os seguintes parâmetros: $t_0 = 0$ horas-f (“f” de funcionamento), $\alpha = 2$, $\beta = 6.500$ horas-f
- Periodicidade de manutenção preventiva: $t_p = 2.690$ horas-f
- Regime de funcionamento do componente (escovas) da TC: 12 horas-f/dia x 286 dias/ano
- Coeficiente de simultaneidade das escovas = 1
- Dias em falta até à sua substituição preventiva: $\Delta t_p = 30$ dias
- Dias já acumulados de funcionamento: $T = 256$ dias
- Custo de uma paragem para MC no caso de uma falha: $C_{MC} = 6.780$ €
- Custo de uma paragem normal para manutenção preventiva: $C_{MP} = 2.220$ €
- Custo de uma paragem antecipada para manutenção preventiva (de oportunidade):
 $C_{MP} = 1.860$ € (só praticamente resultante do material)
- Taxa mínima de atratividade (de referência) em vigor na empresa para esta natureza de problemas: 5% ao ano

Para prosseguir, há que primeiramente, converter todos os dados na mesma unidade de tempo, ou seja, passar de horas-f para dias de calendário. Assim têm-se:

- Regime de funcionamento das escovas (afetado do coeficiente de simultaneidade):

$$286 \times 1 = 286 \text{ dias/ano}$$

$$- \beta = 6.500 \text{ horas-f} \rightarrow \beta = 6.500/12 \times 365/286 = 691 \text{ dias}$$

$$- t_p = 2.690 \text{ horas-f} \rightarrow t_p = 2.690/12 \times 365/286 = 286 \text{ dias}$$

- Dias já acumulados de funcionamento das escovas até falha da ampola: Se existisse um contador horário, dever-se-ia proceder a um cálculo semelhante aos anteriores, no entanto neste caso, o cadastro forneceu o histórico. Assim os dias já “trabalhados” pelas escovas são calculados pela diferença: $286 - 30 = 256$ dias.

Prosseguindo:

- Pela Expressão 2.4, calcula-se a probabilidade de ocorrer uma falha até à sua substituição preventiva (durante $\Delta t_p = 30$ dias):

$$F(\Delta t_p | t_p) = \frac{F(t_p + \Delta t_p) - F(t_p)}{1 - F(t_p)} = \frac{0,1574 - 0,1282}{0,8718} \cong 0,0335$$

- Pela Expressão 6.15 obtém-se a taxa de referência diária:

$$\text{Taxa ref}^a \text{ dia} = (1 - \text{taxa anual})^{\left(\frac{1}{365}\right)} - 1 \quad (6.15)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$\text{Taxa ref}^a \text{ dia} = (1 - 0,05)^{\left(\frac{1}{365}\right)} - 1 \cong 0,0134 \% \text{ dia}$$

Veja-se agora os custos uniformes (diários) das duas alternativas, tendo em conta os fatores de conversão (Assis, 2014):

- Valor presente de um capital futuro conforme Expressão 6.6

- Rendas iguais equivalentes a um capital presente, pela Expressão 6.16:

$$A = P \cdot \left[\frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \quad (6.16)$$

Onde:

A - Renda no fim de cada período de capitalização

P - Valor presente do capital

i - Taxa de juro por período

n - Número de períodos de capitalização

Alternativa Não Antecipar a MPS:

Neste caso, considera-se efetuar a intervenção de MC à ampola e substituir as escovas em MPS só após $\Delta t_p = 30 \text{ dias}$. A Figura 6.20 mostra o *cash-flow* previsual resultante desta decisão, na qual F representa a probabilidade de as escovas falharem em qualquer momento até Δt_p , circunstância na qual verificar-se-á o custo de uma intervenção de MC (C_{MC}) e $(1 - F)$ a probabilidade de não falharem, circunstância na qual verificar-se-á o custo de uma intervenção de MP (C_{MP} normal).

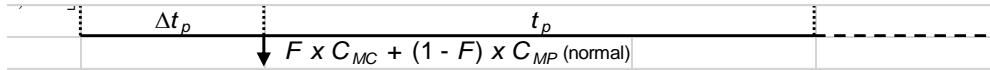


Figura 6.20: Intervenção alternativa de não antecipar a MPS

Para o custo da alternativa de não antecipar (CNA) serve a Expressão 6.17 do custo diário uniforme:

$$CNA = \frac{F(\Delta t_p|t_p) \cdot C_{MC} + (1 - F(\Delta t_p|t_p)) \cdot C_{MP(normal)}}{(1 + Taxa\ ref^a)^{\Delta t_p}} \times \frac{Taxa\ ref^a \cdot (1 + Taxa\ ref^a)^{(t_p + \Delta t_p)}}{(1 + Taxa\ ref^a)^{(t_p + \Delta t_p)} - 1} \quad (6.17)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$CNA = \frac{0,0335 \times 6.780 + (1 - 0,0335) \times 2.220}{(1 + 0,0134)^{30}} \times \frac{0,0134 \times (1 + 0,0134)^{(286+30)}}{(1 + 0,0134)^{(286+30)} - 1} = 7,64 \text{ [€/dia]}$$

Alternativa Antecipar a MPS:

Neste caso, considera-se efetuar simultaneamente a intervenção de MC à ampola e a MPS das escovas, isto é, antecipar $\Delta t_p = 30 \text{ dias}$ à substituição das escovas, a Figura 6.21 permite entender melhor o descrito. Note-se que a seta da Figura 6.21 indica que a MPS foi antecipada.



Figura 6.21: Intervenção alternativa de antecipar a MPS

Para o custo da alternativa de antecipar (CA) serve a Expressão 6.18 do custo diário uniforme:

$$CA = C_{MP(antecipada)} \times \frac{Taxa\ ref^a \cdot (1 + Taxa\ ref^a)^{t_p}}{(1 + Taxa\ ref^a)^{t_p} - 1} \quad (6.18)$$

Substituindo valores, obtém-se:

$$CA = 1.860 \times \frac{0,0134 \times (1 + 0,0134)^{286}}{(1 + 0,0134)^{286} - 1} = 6,63 \text{ [€/dia]}$$

Mais uma vez, foi desenvolvido para esta dissertação um modelo em EXCEL com o objetivo de efetuar todos os cálculos necessários para a tomada de decisão em qualquer momento e noutras circunstâncias de forma rápida e fácil.

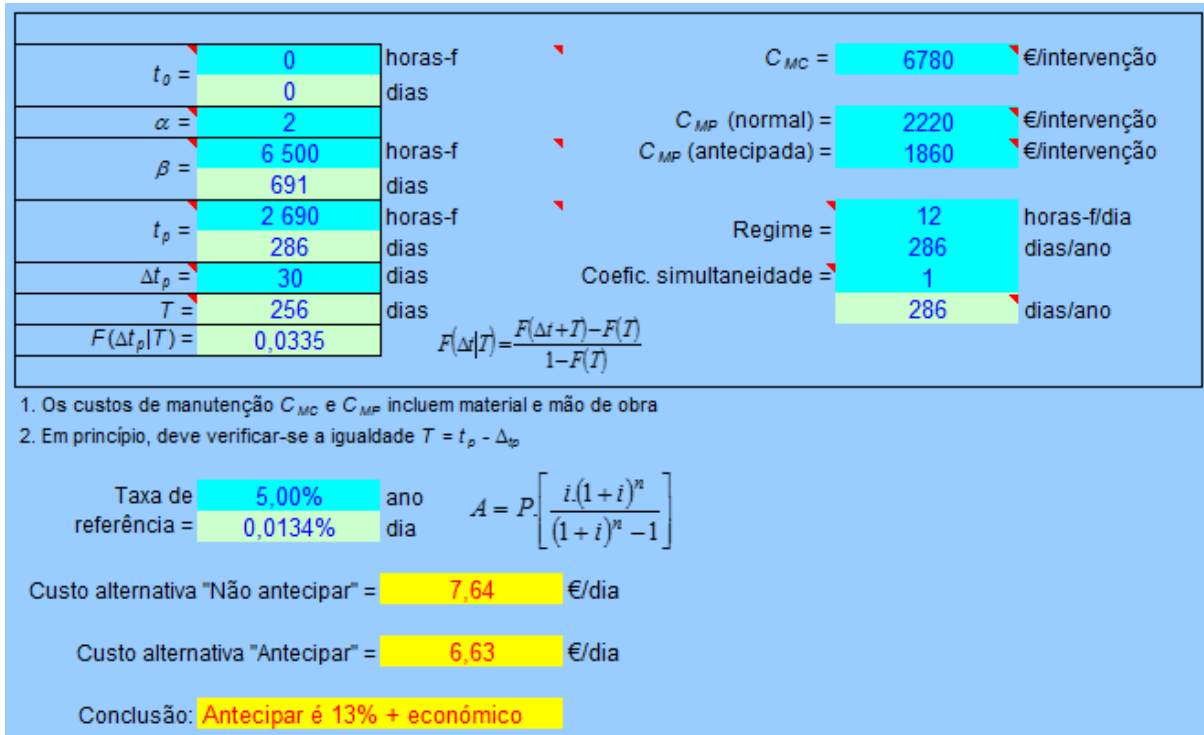


Figura 6.22: Programa de Antecipação de MPS para apoio à decisão

Conclusão:

Antecipar a MPS das escovas e substituir simultaneamente a ampola em MC é 13% mais económico, conforme o cálculo seguinte:

$$\left| \frac{CA - CNA}{CNA} \right| = \left| \frac{6,63 - 7,64}{7,64} \right| \cong 0,13 \cong 13 \%$$

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

O trabalho realizado pretende dar resposta ao objetivo proposto no Capítulo 1, tendo sido aplicada a metodologia RCM a equipamentos biomédicos da especialidade de imagiologia.

Também a estimação dos parâmetros da distribuição fiabilística que melhor se ajusta aos dados da ampola de raios X, provenientes de um registo histórico do fabricante foram estimados. O equipamento em questão é a TC de dupla energia com dupla fonte, da marca *Siemens* e modelo *Somatom Definition Flash*.

O caso de estudo iniciou-se com um primeiro contato *in situ*, numa UCS da zona de Lisboa. Após esta visita e também com base em documentação técnica facultada por várias fontes, tornou-se possível iniciar o estudo da metodologia RCM com a aplicação da ferramenta FMEA, dividindo este equipamento / sistema em vários subníveis até se obterem os LRU. Tornando-se assim possível selecionar políticas de manutenção adequadas centradas na fiabilidade, conforme resultados obtidos através dos diagramas de decisão RCM.

Ao serem definidas tais políticas para cada LRU, identificou-se a ampola de raios X como um componente crítico. Esta identificação tornou-se possível devido à importante análise de criticidade e às respetivas consequências que este LRU provoca tanto a nível funcional, como a nível de segurança e consequentemente a nível económico. O que motivou estudar mais aprofundadamente este componente.

Pelo facto de a MPC não ser a política de manutenção adotada, por ser técnica e economicamente inviável, abriu-se uma “janela” alternativa à política de MC, ou seja, a possibilidade de trocar preventivamente a ampola com base nos MDF. Face a esta consideração, solicitaram-se dados de falhas de ampolas de raios X ao fabricante do equipamento.

Após recolha dos dados, foram efetuadas quatro etapas que permitiram realizar o processo de estimação paramétrica da distribuição. No entanto pelo facto de a ampola estar sujeita a degradação, tais parâmetros não iam ao encontro do que efetivamente se verifica na realidade, desta forma tendo em conta a física da falha e por analogia, entendeu-se efetuar um ajuste de tais parâmetros de modo a

descrever (o melhor possível) o comportamento real de cada MDF. Este ajuste foi realizado após análise e discussão dos resultados obtidos, juntamente com a equipa de engenharia da *Siemens Healthineers*.

Conclui-se assim que a qualidade e tratamento dos dados são de primordial importância para se obter o comportamento real de cada MDF. Poderá justificar-se o ajuste dos parâmetros devido às distintas possibilidades de exploração das diversas TC, isto é, diferentes quantidades de dose (mAs) e energia (keV) para aquisição de imagens, cadências entre exames, número de exames por dia e também influências externas ambientais (temperatura de bolbo seco e humidade relativa).

Para além de descrever o comportamento real da ampola aos diversos MDF, também se demonstrou que a alternativa de considerar os MDFC numa análise fiabilística é mais económica do que, a alternativa de considerar apenas o MDF predominante. Logo, a análise considerando todos os MDF é aconselhada. Para esse efeito, implementaram-se métodos de simulação em computador, usando a técnica de Monte-Carlo, facilmente implementável em EXCEL, tornando possível obter-se TTF resultantes dos MDFC e através de uma análise de sensibilidade, obter a solução ótima económica de substituição preventiva.

Face ao elevado custo considerado (130.000€) de aquisição da ampola, conclui-se neste caso de estudo que a política de MC torna-se favorável, ou seja *run-to-failure*. No entanto prosseguiu-se no caso de estudo considerando também um custo de aquisição moderado (10.000€) – resultando numa periodicidade ótima económica de substituição preventiva de 1.700 minutos de radiação, e fiabilidade de 0,79. Isto é, em cada dez intervenções de manutenção, (aproximadamente) duas seriam corretivas.

Em caso de falha da ampola, e se não existir um sobressalente em *stock*, os CO decorrentes do tempo que medeia entre a sua encomenda ao fornecedor e a sua disponibilidade, podem ser muito elevados. Por esse motivo, torna-se necessária uma análise económica prévia para avaliar a hipótese de manter permanentemente uma unidade em *stock*. Recorreu-se ao EXCEL e desenvolveu-se um simulador para os dois cenários alternativos: Manter ou não de um sobressalente em *stock*. Refira-se que nestas situações de aquisição de sobressalentes para *stock*, convirá também determinar a probabilidade da falha se vir a concretizar ou não.

No caso de estudo conclui-se que manter permanentemente um sobressalente em *stock* é mais económico do que não o fazer e que, a probabilidade dessa alternativa ser a mais económica é 0,965 e que a probabilidade de não o ser é 0,035.

Aproveitar a oportunidade de paragem de uma TC para antecipar ou não a substituição preventiva de um componente, pode trazer benefícios e vantagens económicas que devem ser

mensuradas. Só assim se pode analisar e ponderar devidamente o benefício em avançar com a manutenção de oportunidade ou não. Face às considerações no caso de estudo, ponderou-se esta situação e concluiu-se que, antecipar em 30 dias a MPS das escovas e substituir simultaneamente a ampola em MC é 13% mais económico.

Como conclusão final, é importante ressaltar a importância que estes estudos fiabilísticos assumem ao serem transferidos da área da indústria com requisitos de fiabilidade, para a indústria do *healthcare*. Dando assim oportunidade ao setor, ainda pouco explorado nesta ótica, de maximizar indicadores que promovam a eficácia e eficiência no apoio à decisão em manutenção na gestão de ativos físicos, permitindo alcançar os objetivos propostos nesta dissertação.

7.2. Trabalhos Futuros

Em termos de estudos de fiabilidade, pode-se dizer que até ao momento, pouco existia sobre este tipo de estudos aplicados a equipamentos biomédicos da especialidade da imagiologia. Com esta dissertação espera-se contribuir e motivar no desenvolvimento de mais estudos em equipamentos de elevada complexidade que digam respeito particularmente à indústria da saúde. Através de metodologias científicas passíveis de aplicação, como a aqui demonstrada, no sentido de melhorar eficaz e eficientemente a gestão de ativos nos SMI das UCS.

Partindo como base no trabalho desenvolvido, poderão existir condições para se desenvolverem, aplicações em *softwares* para apoio à decisão dos SMI, cujos *interfaces* com os gestores de ativos sejam mais *user friendly* e simultaneamente mais potentes. Como perspetivas de trabalhos futuros ficam por estudar algumas situações cujo desenvolvimento neste momento obrigaria esta dissertação a tomar proporções volumosas e porventura estender-se indefinidamente no tempo.

No entanto, apontam-se alguns trabalhos futuros, nomeadamente estender a análise de viabilidade económica de manutenção de um sobressalente caro em *stock* ao caso particular de o sobressalente ser reparável um determinado número de vezes, nas seguintes condições:

- Existe apenas um sobressalente, implicando um intervalo de tempo considerável aguardando a sua reparação após cada falha;
- Existem dois sobressalentes, logo que um deles falha, é substituído pelo outro, enquanto é reparado, voltando logo após para *stock* onde fica a aguardar uma nova oportunidade para voltar ao serviço, constituindo assim um rotável;

Estender a análise económica de antecipação de substituição preventiva a mais de um componente, aproveitando a paragem do equipamento ao qual os componentes pertencem (manutenção de oportunidade).

Aprofundar o estudo em ferramentas de análise de risco neste ambiente específico, para poder alimentar a metodologia RCM nas análises de criticidade, evoluindo possivelmente, para uma metodologia RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Safety*).

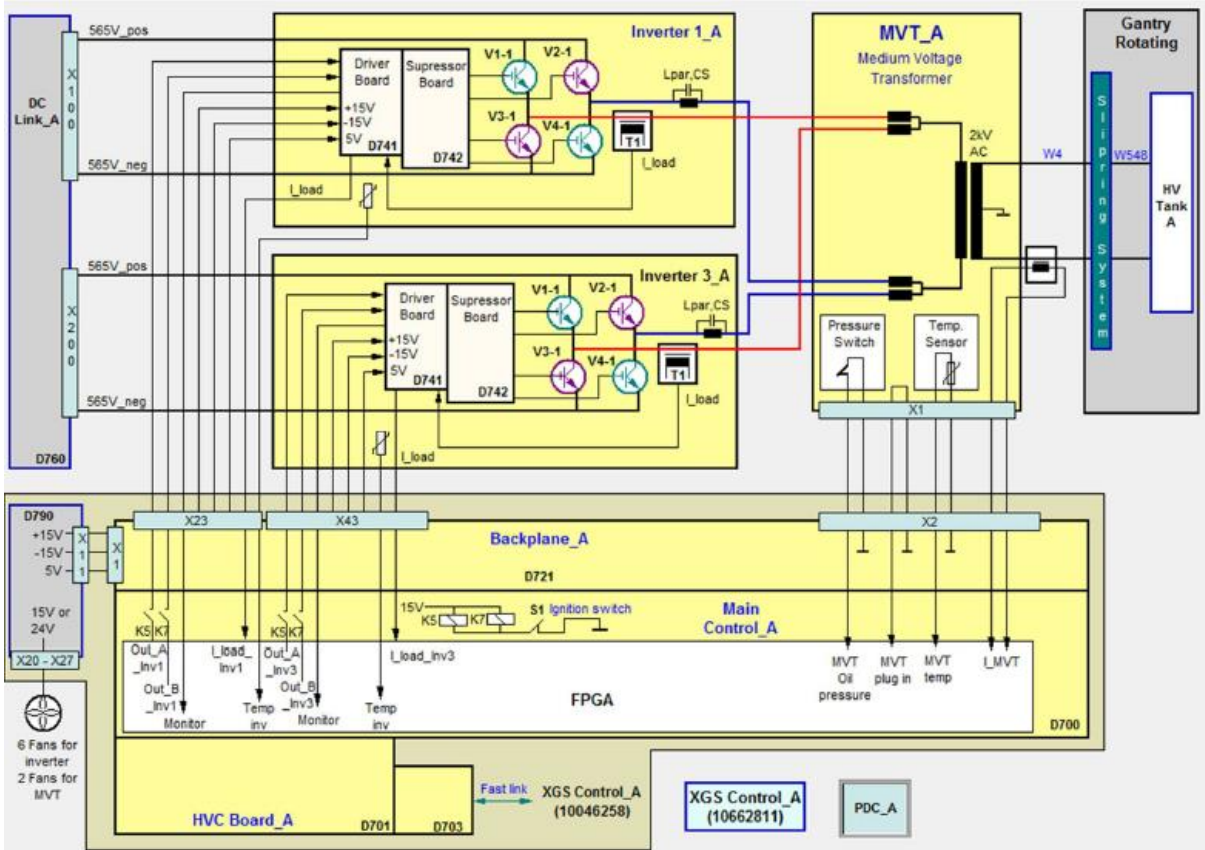
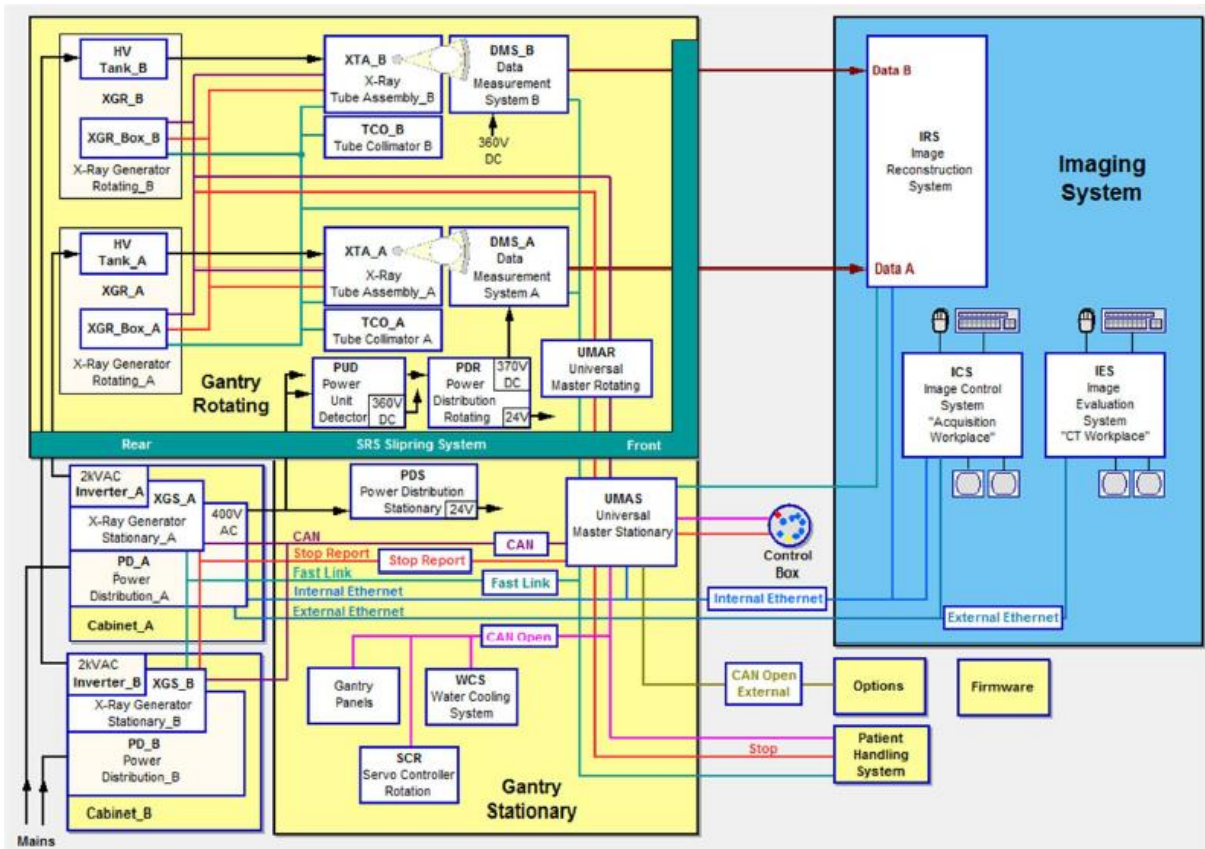
Referências Bibliográficas

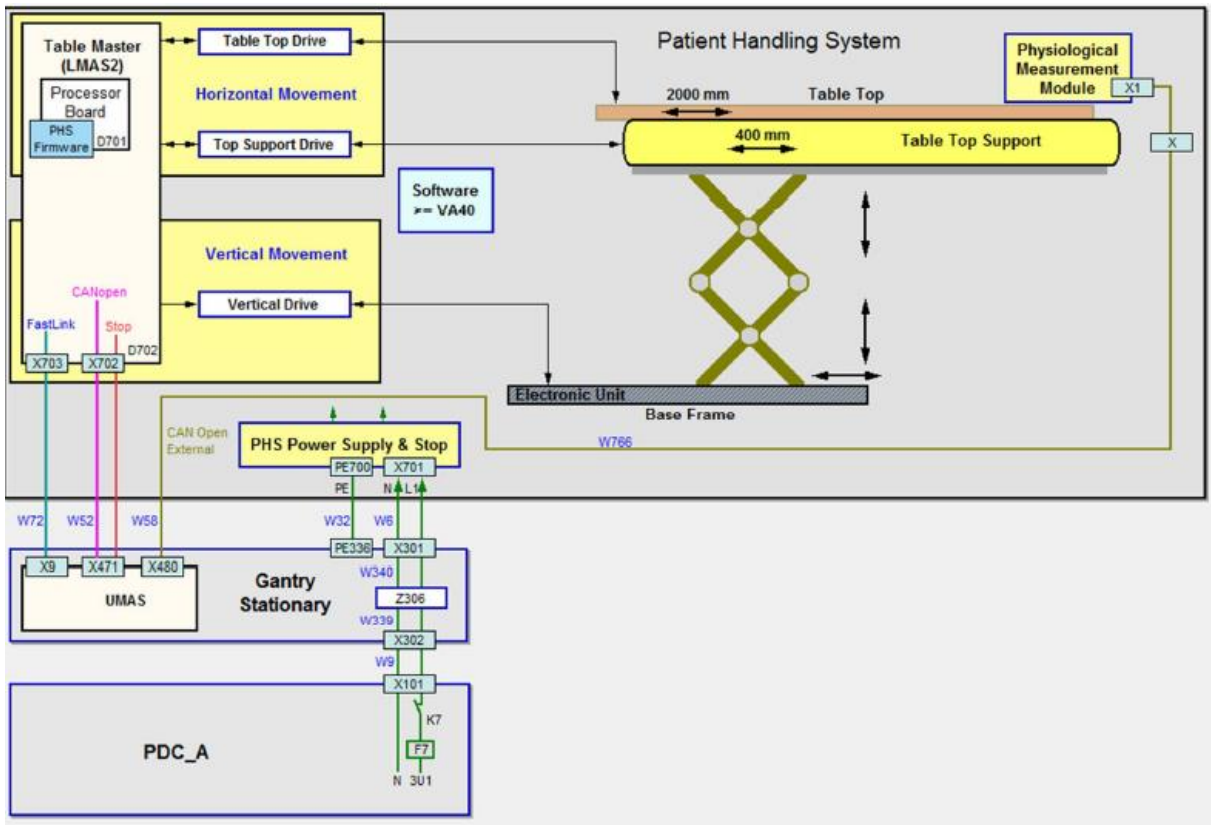
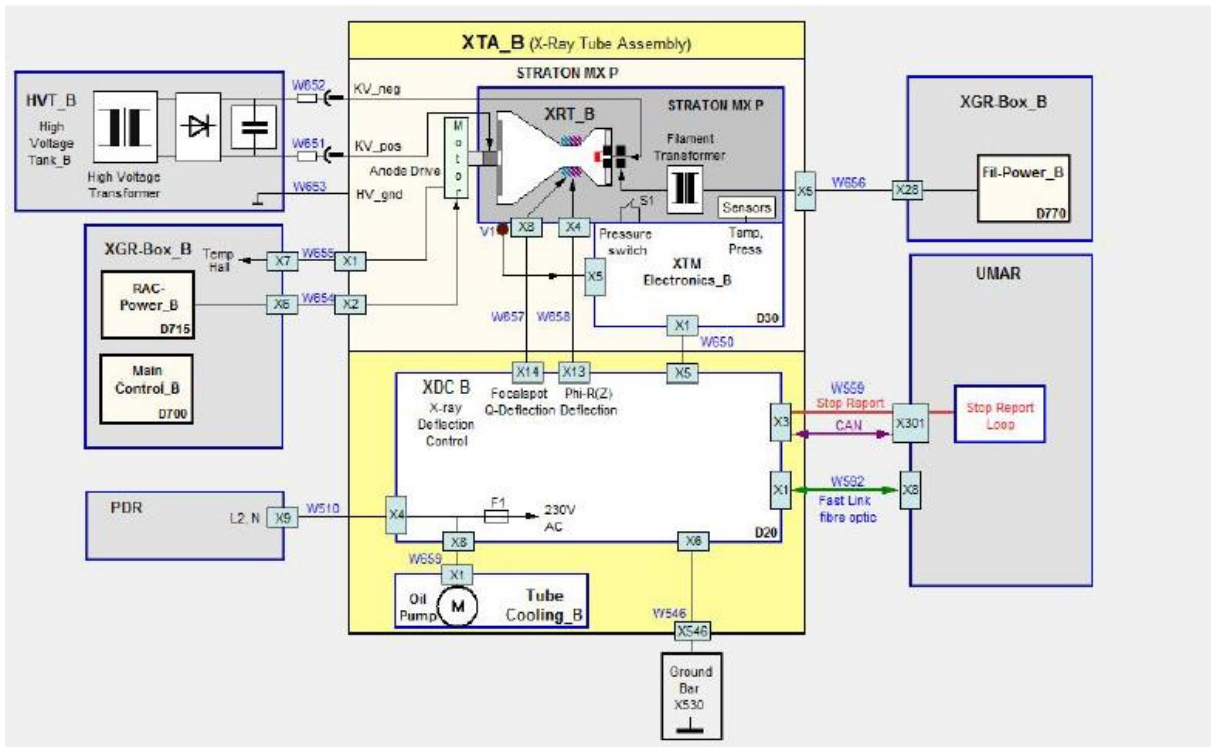
- Amaral, M. (2018)**, *PME's vão entrar na Revolução da Indústria 4.0 mas não se trata de um "Big Bang"*, *Jornal Económico*, <http://www.jornaleconomico.sapo.pt/noticias/pme-vaio-entrar-na-revolucao-da-industria-4-0-mas-nao-se-trata-de-um-big-bang-155136>, Acedido em 14 de Abril de 2018
- Assis, R. (2014)**, *Apoio à decisão em manutenção na gestão de ativos físicos – Segunda Edição*, Lidel - Edições Técnicas, ISBN 978-989-752-112-6, Lisboa
- Assis, R. & Ribeiro, J. (2018)**, *Periodicidade ótima económica de MPS de um componente crítico apresentando mais de um modo de falha*, *Jornadas da Manutenção 2018*, 22-23 de Novembro de 2018, Exponor, Porto
- Behling, R. (2016)**, *Modern Diagnostic X-ray Sources*, CRC Press, ISBN 978-1-4822-4133-4, New-York
- Bushberg, J., Seibert, A., Leidholdt, E. & Boone, J. (2012)**, *The Essential Physics of Medical Imaging – third edition*, LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, ISBN 978-0-7817-8057-5, Philadelphia
- Cancer-Fighting Nanorobots (2018)**, *Cancer-Fighting Nanorobots*, eeweb, <https://www.eeweb.com/quizzes/cancer-fighting-nanorobots>, Acedido a 15 de Abril de 2018
- Carvalho, R. M. do C. (2017)**, *Industry 4.0 – Is Portugal prepared for the future?*, Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria
- Celdrán, A. H., Pérez, M. G., Clemente, F. J. G. & Pérez, G. M. (2018)**, *Sustainable securing of Medical Cyber-Physical Systems for the healthcare of the future*, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Vol. 19, pp.138-146
- Chalifoux, A. & Baird, J. (1999)**, *Reliability centered maintenance (RCM) Guide*, USACERL Technical Report 99/41
- Correia, A. B., Deus, P. & Baptista, J. R. (2016)**, *Indústria 4.0: Construir a empresa digital*, PricewaterhouseCoopers Portugal, 1, pp. 1-30
- Crispim, R. & Vieira, A. L. (2014)**, *Computer Tomography Scanners in Portugal (1990-2011)*, *Jornal de Investigação Biomédica e Biofarmacêutica*, pp. 55-63
- Dou, F., Zhou, W. & Long, Z. (2014)**, *A maintenance strategy for urban maglev train based on RCM*, *IEEE - International Conference on Information and Automation*, pp. 1244-1249
- Dunn, S. (2003)**, *The fourth generation of maintenance*, *Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies (ICOMS 2003)*, May 20–23, Perth, Austrália
- Farinha, J. M. T. (2016a)**, *Gestão, organização e manutenção na indústria farmacêutica e hospitalar*, *Revista Manutenção*, nº 128, p. 53
- Farinha, J. M. T. (2016b)**, *Sistemas de informação para a manutenção*, *Revista Manutenção*, nº 128, pp. 54-56
- Fernandes, F. (2013)**, *Testes de Ajuste a Distribuições Estatísticas e Métodos para Estimação dos Parâmetros em Análises de Fiabilidade*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa
- Ferreira L.A. & Sobral J. (2018)**, *A importância da fiabilidade e da manutenção para a Economia Circular*, *Revista Manutenção*, nº 137, pp. 8-12
- Gulezian, L. A. (2015)**, *3-D printer being used to make plastic model organs to save lives*, *ABC News*, <https://abc7news.com/health/3d-printer-being-used-to-make-plastic-organs/517177>, Acedido a 18 de Abril de 2018

- Hendee, W. R. & Ritenour, E. R. (2003)**, *Medical Imaging Physics - Fourth Edition*, Medical Physics, ISBN 0-471-38226-4, USA
- Hsieh, J. (2009)**, *Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances - Second Edition*, SPIE Press, ISBN 978-0-8194-7533-6, Wiley Interscience
- Lee, G.-Y., Kim, M., Quan, Y.-J., Kim, M.-S., Kim, T. J. Y., Yoon, H.-S., Min, S., Kim, D.-H., Mun, J.-W., Oh, J. W., Choi, I. G., Kim, C.-S., Chu, W.-S., Yang, J. Bhandari, B., Lee, C.-M., Ihn, J.-B. & Ahn, S.-H. (2018)**, *Machine health management in smart factory: A review*, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, pp. 987-1009
- López-Tarjuelo, J., Bouché-Babiloni, A., Santos-Serra, A., Morillo-Macías, V., Calvo, F. A., Kubyshin, Y. & Ferrer-Albiach, C. (2014)**, *Failure mode and effect analysis oriented to risk-reduction interventions in intraoperative electron radiation therapy: The specific impact of patient transportation, automation, and treatment planning availability*, Radiotherapy and Oncology, Vol. 113, pp. 283-289
- Loureiro, R. (2018)**, *Logística 4.0 na saúde: Utopia ou realidade?*, Supply Chain Magazine, <http://www.supplychainmagazine.pt/2018/02/27/logistica-4-0-na-saude-utopia-ou-realidade/>, Acedido a 23 de Abril de 2018
- Mahfoud, H., El Barkany, A. & El Biyaali, A. (2016)**, *Preventive Maintenance Optimization in Healthcare Domain: Status of Research and Perspective*, Journal of Quality and Reliability Engineering, Vol. 2016, pp. 1-10
- Mano, S. M. V. M. da C. (2018)**, *Cálculos Dosimétricos em Exames de Tomografia Computorizada ao Crânio*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa
- Morais, R. (2015)**, *Radiações ionizantes*, Direção Geral de Saúde, <https://www.dgs.pt/saude-ambiental/areas-de-intervencao/radiacoes/ionizantes/enquadramento.aspx>, Acedido em 19 de Setembro de 2018
- Moubray, J. (1997)**, *Reliability-Centered Maintenance (RCM) – Second Edition*, Industrial Press, Inc., ISBN 0-8311-3146-2, Oxford, Great Britain
- Mwanza, B. G. & Mbohwa, C. (2015)**, *An Assessment of the Effectiveness of Equipment Maintenance Practices in Public Hospitals*, Procedia Manufacturing, Vol. 4, pp. 307–314
- Nouailhetas, Y., Eduardo, C. & Almeida, B. de (2008)**, *Apostila Educativa - Radiações Ionizantes e a Vida*, CNEN, www.cnen.gov.br, Acedido em 22 de Setembro de 2018
- Oliveira, V. J. J. (2018)**, *Gestão do Ciclo de Vida de Dispositivos Médicos: Papel do Engenheiro Biomédico*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa
- Penedo, J., Madahil, A., Ferreira, A., Nunes, A., Pereira, J., Venâncio, J., Maia, M. G. & Alves, P. (2013)**, *Carta de Equipamentos Médicos Pesados*, Diário Da República nº 45, 2ª Série, pp.1–323
- Pinto, J. P. (2013)**, *Manutenção Lean*, Lidel - Edições Técnicas, ISBN 978-972-757-877-1, Lisboa
- Queiroga, R. (2016)**, *A Industrial Internet of Things no cerne da evolução*, Revista Manutenção, nº 128, pp. 70-71
- Rah, J. E., Manger, R. P., Yock, A. D. & Kim, G. Y. (2016)**, *A comparison of two prospective risk analysis methods: Traditional FMEA and a modified healthcare FMEA*, Medical Physics, Vol. 43, pp. 6347–6353
- Rausand, M. (2004)**, Chapter 9 Reliability Centered Maintenance, 1–33
- ReliaSoft (2014a)**, *Chapter3: Life Distributions*, ReliaSoft's Life Data Analysis Reference, http://reliawiki.org/index.php/Life_Distributions, Acedido a 25 de Julho de 2018
- ReliaSoft (2014b)**, *Chapter 4: Parameter Estimation*, ReliaSoft's Life Data Analysis Reference, http://reliawiki.org/index.php/Life_Distributions, Acedido a 25 de Julho de 2018

- ReliaSoft (2014c)**, *Chapter 5: Life Data Classification*, ReliaSoft's Life Data Analysis Reference, http://reliawiki.org/index.php/Life_Distributions, Acedido a 25 de Julho de 2018
- Ridgway, M., Clark, M. & Bettinardi, C. (2016)**, *Reliability-Centered Maintenance: A tool for optimizing medical device maintenance*, Biomedical Instrumentation and Technology, Vol. 50, p. 412
- Rodrigues, G., Carvalho, B., Reigoto, A. & Elias, A. (2017)**, *Alinhamento de competências para responder aos desafios da Indústria 4.0*, Revista Superavit, nº 2, pp. 65-75
- Sabouhi, H., Fotuhi-Firuzabad, M. & Dehghanian, P. (2016)**, *Identifying critical components of combined cycle power plants for implementation of reliability-centered maintenance*, CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 2, pp. 87-97
- Salah, M., Osman, H. & Hosny, O. (2018)**, *Performance-Based Reliability-Centered Maintenance Planning for Hospital Facilities*, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 32
- Schardt, P., Deuringer, J., Freudenberger, J., Hell, E., Knüpfer, W., Mattern, D. & Schild, M. (2004)**, *New x-ray tube performance in computed tomography by introducing the rotating envelope tube technology*, Medical Physics, Vol. 31, pp. 2699–2706
- Siemens Healthineers (2018)**, *Guardian Program™ including TubeGuard*, <https://www.healthcare.siemens.com/services/customer-services/asset-evolution-services/guardian-program-including-tube-guard>, Acedido a 23 de Novembro de 2018
- Silva, J. (2016)**, *Análise de falhas em elementos mecânicos: aplicação de métodos fiabilísticos*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- Silva, R. A. C. (2014)**, *Tomografia Computorizada: Análise e optimização das práticas na realização de exames em adultos e pediátricos. Análise do nível de adequação às recomendações internacionais*, Tese de Mestrado, Universidade Católica Portuguesa, Lisboa
- Sobral, J. (2010)**, *Utilização da Metodologia “RAMS” na análise de barreiras de segurança de instalações industriais de risco elevado*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- Sobral, J. (2019)**, *Aplicações das Técnicas de Avaliação do Risco na Gestão de Activos*, Conferência "O Risco na Gestão de Activos", 28 de Fevereiro de 2019, IPQ, Caparica
- Soler, C. (2018)**, *Health 4.0 Oriented to Non-surgical Treatment*, Springer International Publishing AG 2018, pp. 513-523
- Suryono, M. A. E. & Rosyidi, C. N. (2018)**, *Reliability Centred Maintenance (RCM) Analysis of Laser Machine in Filling Lithos at PT X*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 319
- Taghipour, S. (2011)**, *Reliability and Maintenance of Medical Devices*, Tese de Doutoramento, Universidade de Toronto, Toronto
- Tang, Y., Zou, Z., Jing, J., Zhang, Z. & Xie, C. (2015)**, *A framework for making maintenance decisions for oil and gas drilling and production equipment*, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 26, pp. 1050-1058
- Umpawanwong, P. & Chutima, P. (2015)**, *Application of Reliability Centered Maintenance Concept to Petrochemical Industry*, International Conference on Industrial Technology and Management Science, 2015
- Veludo, P. C. (2011)**, *Efeitos da Radiação X e Níveis de Exposição em Exames Imagiológicos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra, Coimbra
- Wave, L. & Wave, M. (2005)**, *The Electromagnetic Spectrum*, ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/317371695_The_Electromagnetic_Spectrum, Acedido em 30 de Setembro de 2018

Anexo 1 – Ficha técnica da TC





Anexo 2 – Estrutura da Tabela FMEA

Equipamento	Sistemas	Subsistemas (LRU)	Modos de falha	Código ISO 14224
Tomografia Computorizada				TC
Gantry rotativa				01
	XGR box (filamento e motor ânodo)	1 Alimentação elétrica da RAC-Power fora de parâmetros nominais 2 Alimentação elétrica da Fil-Power fora de parâmetros nominais	01.01 01.01.01 01.01.02	
	HVT (Tank AT - 140 kV)	1 Valor de tensão anormal para aplicação de campo elétrico 2 Rebentamento interno do tanque AT 3 Derrame de óleo isolante do tanque AT na gantry	01.02 01.02.01 01.02.02 01.02.03	
	Slipring	1 Parte rotativa da gantry não é alimentada eletricamente nos valores nominais de tensão 2 Parte rotativa e estacionária da gantry não efetuam transmissões de sinais	01.03 01.03.01 01.03.02	
	XTA (Ampola Straton)	1 Perda de rigidez dielétrica no interior da ampola 2 Geração insuficiente de raios X 3 Invólucro da ampola com desequilíbrios dinâmicos 4 Diminuição do caudal da eletrobomba de recirculação do óleo de arrefecimento 5 Fuga de óleo de arrefecimento da ampola 6 Paragem do invólucro da ampola 7 Infiltração de ar no circuito de arrefecimento da ampola	01.04 01.04.01 01.04.02 01.04.03 01.04.04 01.04.05 01.04.06 01.04.07	
	XDC (Control)	1 Falha na deflexão e forma do feixe de eletrões, colidindo em zonas desadequadas do ânodo	01.05 01.05.01	
	Radiador Cooling	1 Derrame de óleo do circuito de arrefecimento da ampola	01.06 01.06.01	
	UMAR (universal master rotating)	1 Falha de transmissão de sinais de controlo 2 Falha de interface com periféricos 3 Falha de firmware	01.07 01.07.01 01.07.02 01.07.03	
	PDR (power distribution rotating)	1 Falha de alimentação elétrica à parte rotativa	01.08 01.08.01	
	DMS (data measurement system)	1 Erro na transmissão de dados para o reconstrutor de imagem (IRS) 2 Erros de offset do sinal recebido 3 Falhas de sinal nas imagens 4 Erro de deteção de radiação	01.09 01.09.01 01.09.02 01.09.03 01.09.04	
Gantry estacionária				02
	PDS (power distribution stationary)	1 Falha de alimentação elétrica à parte estacionária	02.01 02.01.01	
	UMAS (universal master stationary)	1 Falha de transmissão de sinais de controlo 2 Falha de interface com periféricos 3 Falha de firmware	02.02 02.02.01 02.02.02 02.02.03	
	MVT (MT transformer)	1 Valores de tensão fora de parâmetros nominais de funcionamento 2 Atuação do sensor de pressão elevada 3 Atuação do sensor de temperatura elevada 4 Derrame de óleo isolante do MVT na gantry	02.03 02.03.01 02.03.02 02.03.03 02.03.04	
	XGS (Inverter)	1 Falha na conversão / geração da corrente alternada no inversor	02.04 02.04.01	
Sistema de Imagem				03
	IRS (reconstrução imagem)	1 Falha na receção de dados 2 Falha no armazenamento de dados 3 Falha na reconstrução (processamento) de imagem 4 Unidade central de processamento (CPU) não liga	03.01 03.01.01 03.01.02 03.01.03 03.01.04	
	IES (avaliação imagem)	1 Falha de software 2 Falha da fonte de alimentação 3 Falha nos discos de armazenamento de dados	03.02 03.02.01 03.02.02 03.02.03	
	ICS (controlo principal da TC)	1 Falha de software 2 Falha da fonte de alimentação 3 Falha nos discos de armazenamento de dados	03.03 03.03.01 03.03.02 03.03.03	
PHS (mesa)				04
	LMAS2 (Master control)	1 Falha de transmissão de sinais de controlo 2 Falha de interface com periféricos 3 Controlo do sistema da mesa bloqueado	04.01 04.01.01 04.01.02 04.01.03	
	PMM (Módulo medições fisiológicas)	1 Falha na monitorização da pulsação do doente	04.02 04.02.01	
	Controlo movimentos verticais	1 Paragem do movimento vertical da mesa	04.03 04.03.01	
	Controlo movimentos horizontais	1 Paragem do movimento horizontal da mesa 2 Intermitências no movimento horizontal da mesa	04.04 04.04.01 04.04.02	
	PHS (Modulo alimentação)	1 Mesa sem alimentação elétrica	04.05 04.05.01	

FMEA nº: 1
 Data: 25/07/2018
 Equipamento: TC Siemens Somatom Definition Flash
 Sistema: Gantry Rotativa

Código Equipamento: TC
 Código do Sistema: 01

FMEA								
Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
XGR box (filamento e motor ânodo)	01.01	Alimentar eletricamente o motor que imprime rotação à ampola	Alimentação elétrica da RAC-Power fora de parâmetros nominais	01.01.01	Avaria de componentes do circuito eletrónico da placa RAC-Power Bobinagem do motor em curto-circuito ou eventualmente interrompida	Sobreaquecimento do ânodo, ruídos anormais da ampola, artefatos de imagem	Funcionais: Sim Segurança: Sim, repetição exame Económicas: Sim	Nível II
		Alimentar eletricamente o filamento do cátodo da ampola para gerar a nuvem eletrónica através do efeito termiónico	Alimentação elétrica da Fil-Power fora de parâmetros nominais	01.01.02	Avaria de componentes do circuito eletrónico da placa Fil-Power Filamento com desgaste ou eventualmente interrompido	Anormal aquecimento do filamento (cátodo) potenciando o seu desgaste / degradação, artefatos de imagem	Funcionais: Sim Segurança: Sim, repetição exame Económicas: Sim	Nível II
HVT (Tank AT - 140 kV)	01.02	Elevar e retificar a alta tensão, com o objetivo de criar o campo elétrico entre ânodo e cátodo, necessário para projetar a nuvem eletrónica no ânodo para posterior geração de raios X	Valor de tensão anormal para aplicação de campo elétrico	01.02.01	Curto circuitos entre espiras no transformador elevador, eletrónica danificada no retificador (díodos retificadores ou condensadores de filtragem queimados)	Desadequada geração de raios X potencializando artefatos de imagem (<i>stripes, wave</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Sim, repetição exame Económicas: Sim	Nível II
		Garantir a integridade estrutural do tanque	Rebentamento interno do tanque AT	01.02.02	Existência de bolhas de ar no interior do tanque AT	Impossibilidade de gerar AT à ampola	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
		Garantir a estanquicidade do tanque	Derrame de óleo isolante do tanque AT na gantry	01.02.03	Degradação dos vedantes (excesso de temperatura)	Dissipação de óleo pelo interior da gantry, diminuição do tempo de funcionamento do HVT	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II

Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
<i>Slipring</i>	01.03	Transferir energia elétrica em corrente alternada no valor nominal de tensão de 2 kV, 400 V e 230 V à <i>gantry</i> rotativa Transmitir sinais entre as partes estacionária e rotativa da <i>gantry</i>	Parte rotativa da <i>gantry</i> não é alimentada eletricamente nos valores nominais de tensão	01.03.01	Escovas de potência estão abaixo da tolerância admissível, eventuais deformações ou sujidades nos anéis dos <i>sliprings</i>	Alimentação elétrica da parte rotativa não é devidamente efetuada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Parte rotativa e estacionária da <i>gantry</i> não efetuam transmissões de sinais	01.03.02	Escovas de transmissão de sinal estão abaixo da tolerância admissível, eventuais deformações ou sujidades nos anéis dos <i>sliprings</i>	Comunicação da parte rotativa não é devidamente efetuada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II

Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
XTA (Ampola <i>Straton</i>)	01.04	Produzir os raios X (intensidade de dose) através da nuvem eletrónica que é gerada pelo filamento (inserido em vácuo), através do campo elétrico que regula a energia dos raios X. Os eletrões da nuvem eletrónica irão ser projetados contra o ânodo que está com uma elevada velocidade de rotação, dinamicamente equilibrado e a efetuar libertação de calor através do óleo de arrefecimento	Perda de rigidez dielétrica no interior da ampola	01.04.01	Diminuição de vácuo no interior da ampola, entrada de partículas de ar	Ruído anormal devido à intensidade de corrente de disrupção entre ânodo e cátodo (arcos de contornamento, disrupção), sobreaquecimentos	Funcionais: Artefatos de imagem (<i>stripes</i>) Segurança: Repetição de exame Económicas: 130.000€ + CO + MO	Nível II
			Geração insuficiente de raios X	01.04.02	Filamento degradado (degradação ao longo da vida útil)	Realização de exame não conforme e com perda de qualidade	Funcionais: Diminuição da qualidade de imagem Segurança: Repetição de exame Económicas: 130.000€ + CO + MO	Nível II
			Invólucro da ampola com desequilíbrios dinâmicos	01.04.03	Degradação física do ânodo	Ruído e aquecimento anormais da ampola Filtração do feixe excessiva por depósito de tungsténio na ampola	Funcionais: Artefatos de imagem (<i>moiree</i>) Segurança: Repetição de exame Económicas: 130.000€ + CO + MO	Nível II
			Diminuição do caudal da eletrobomba de recirculação do óleo de arrefecimento	01.04.04	Espiras danificadas (curto circuitadas ou abertas), turbina hidráulica com perda de rendimento	Degradação acelerada da ampola, aquecimento anormal	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: 250€ + CO + MO	Nível II
			Fuga de óleo de arrefecimento da ampola	01.04.05	Falha de estanquicidade devido a degradação dos vedantes	Degradação acelerada da ampola, aquecimento anormal	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: 150€ + CO + MO	Nível II
			Paragem do invólucro da ampola	01.04.06	Atuação da proteção elétrica da ampola	Degradação acelerada da ampola, aquecimento anormal	Funcionais: Degradação acelerada da ampola Segurança: Não Económicas: 130.000€ + CO + MO	Nível II
			Infiltração de ar no circuito de arrefecimento da ampola	01.04.07	Instalação deficiente (purga mal efetuada no circuito de óleo)	Aquecimento anormal Artefatos de imagem (<i>shading</i>) Repetição de exame	Funcionais: Artefatos de imagem Segurança: Repetição de exame Económicas: 130.000€ + CO + MO	Nível II

Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
XDC (<i>Control</i>)	01.05	Criar deflexão e forma do feixe de eletrões que irão colidir no ânodo para produção de raios X	Falha na deflexão e forma do feixe de eletrões, colidindo em zonas desadequadas do ânodo	01.05.01	Avaria de componentes do circuito eletrónico da placa XDC Falha das bobinas defletoras e focais do feixe de eletrões	Feixe de eletrões desalinhados com o ponto focal do ânodo (desvio do alvo), potencializa a má formação de raios X e promove artefatos de imagem (<i>stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Sim Económicas: Sim	Nível II
Radiador <i>Cooling</i>	01.06	Garantir a integridade isolante do radiador com o exterior e efetuar trocas térmicas com o circuito secundário (ar ou eventualmente água)	Derrame de óleo do circuito de arrefecimento da ampola	01.06.01	Falta de estanquicidade, degradação do permutador, excesso de pressão	Incapacidade de efetuar permutas térmicas para arrefecer a ampola	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
UMAR (<i>universal master rotating</i>)	01.07	Controlar e gerir todos os periféricos da <i>gantry</i> rotativa, enviar e receber informação da <i>gantry</i> estacionária e emitir os dados do exame para a unidade IRS	Falha de transmissão de sinais de controlo	01.07.01	Módulos de transmissão de sinal (Rx, Tx), cabos ou conetores dos cabos avariados	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Falha de interface com periféricos	01.07.02	Deficiente interligação com os periféricos da <i>gantry</i> rotativa (XGR, ampola, detetor)	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Falha de <i>firmware</i>	01.07.03	<i>Firmware</i> corrompido	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Não	Nível II
PDR (<i>power distribution rotating</i>)	01.08	Alimentar eletricamente periféricos da parte rotativa da <i>gantry</i>	Falha de alimentação elétrica à parte rotativa	01.08.01	Cabos ou conetores avariados Atuação de proteções elétricas	<i>Gantry</i> não inicia. Realização de exames suspensos	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
DMS (<i>data measurement system</i>)	01.09	Detetar os raios X (atenuados) através das matrizes de detetores e transformá-los em sinal, posteriormente são enviados para reconstrução de imagem (IRS)	Erro na transmissão de dados para o reconstrutor de imagem (IRS)	01.09.01	Módulos de transmissão de sinal (Rx, Tx) entre UMAS e DMS, cabos ou respetivos conetores avariados	Artefatos de imagem (<i>rings, stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Repetição de exame Económicas: Sim	Nível II
			Erros de <i>offset</i> do sinal recebido	01.09.02	Módulos de matrizes de detetores descalibrados	Artefatos de imagem (<i>rings, stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Repetição de exame Económicas: Sim	Nível II
			Falhas de sinal nas imagens	01.09.03	Módulos de matrizes de detetores danificados	Artefatos de imagem (<i>rings, stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Repetição de exame Económicas: Sim	Nível II
			Erro de deteção de radiação	01.09.04	Fonte de alimentação do DMS com anomalia	Artefatos de imagem (<i>rings, stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Repetição de exame Económicas: Sim	Nível II

FMEA nº: 1
 Data: 25/07/2018
 Equipamento: TC Siemens Somatom Definition Flash
 Sistema: Gantry Estacionária

Código Equipamento: TC
 Código do Sistema: 02

FMEA								
Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
PDS (<i>power distribution stationary</i>)	02.01	Alimentar eletricamente todos os periféricos da parte estacionária da <i>gantry</i>	Falha de alimentação elétrica à parte estacionária	02.01.01	Cabos ou conetores avariados Atuação de proteções elétricas	<i>Gantry</i> não inicia. Realização de exames suspensos	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
UMAS (<i>universal master stationary</i>)	02.02	Controlar e gerir todos os periféricos da <i>gantry</i> estacionária, enviar e receber informação da <i>gantry</i> rotativa e emitir os dados do exame para a unidade IRS	Falha de transmissão de sinais de controlo	02.02.01	Módulos de transmissão de sinal (Rx, Tx), cabos ou conetores dos cabos avariados	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Falha de interface com periféricos	02.02.02	Deficiente interligação com os periféricos da <i>gantry</i> estacionária (Painel de controlo, PHS, XGS, painéis da <i>gantry</i> , controlo de rotação da <i>gantry</i> , sistema de arrefecimento de água)	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Falha de <i>firmware</i>	02.02.03	<i>Firmware</i> corrompido	<i>Gantry</i> rotativa pára, fica bloqueada	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Não	Nível II
MVT (MT <i>transformer</i>)	02.03	Elevar a tensão alternada (do inversor) para 2 kV e ligar ao <i>Slipring</i> através de escovas de grafite para alimentar eletricamente a <i>gantry</i> rotativa	Valores de tensão fora de parâmetros nominais de funcionamento	02.03.01	Falta de simetria nas fases de alimentação (trifásico) Curto circuitos entre espiras ou espiras interrompidas do transformador MT	Alimentação elétrica ao <i>slipring</i> não é devidamente efetuada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Atuação do sensor de pressão elevada	02.03.02	Perda de isolamento elétrico no interior do MVT, curto-circuito entre espiras Excesso de tempo de exposição de radiação	Alimentação elétrica ao <i>slipring</i> não é efetuada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Atuação do sensor de temperatura elevada	02.03.03	Existência de bolhas de ar no interior do MVT Excesso de tempo de exposição de radiação	Alimentação elétrica ao <i>slipring</i> não é efetuada	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Derrame de óleo isolante do MVT na <i>gantry</i>	02.03.04	Falha de estanquicidade devido a degradação dos vedantes	Dissipação de óleo no interior da <i>gantry</i>	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
XGS (<i>Inverter</i>)	02.04	Converter a corrente contínua em corrente alternada através da comutação rápida de semicondutores	Falha na conversão / geração da corrente alternada no inversor	02.04.01	Semicondutores queimados devido a degradação, funcionamentos com intensidades de corrente altas (arcos), carga excessiva, aquecimentos anormais	Fornecimento de tensão alternada ao MVT fora de valores nominais	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II

FMEA nº: 1
 Data: 25/07/2018
 Equipamento: TC Siemens Somatom Definition Flash
 Sistema: Sistema de Imagem

Código Equipamento: TC
 Código do Sistema: 03

FMEA								
Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
IRS (reconstrução imagem)	03.01	Receber e processar os dados do DMS para reconstruir a imagem	Falha na receção de dados	03.01.01	Módulos de transmissão de sinal (Rx, Tx), cabos ou conetores dos cabos avariados	Impossibilidade de reconstruir imagem, repetição de exame	Funcionais: Sim Segurança: Sim Económicas: Sim	Nível II
			Falha no armazenamento de dados	03.01.02	Disco cheio (sem espaço disponível) ou corrompido	Impossibilidade de reconstruir imagem, repetição de exame	Funcionais: Sim Segurança: Sim, repetição exame Económicas: Possivelmente	Nível II
			Falha na reconstrução (processamento) de imagem	03.01.03	Falta de projeções suficientes no reconstrutor, falha de <i>hardware</i> , temperatura elevada	Artefatos de imagem, reinício do sistema	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Unidade central de processamento (CPU) não liga	03.01.04	Temperatura ambiente alta, filtros colmatados, avaria do ventilador ou fonte de alimentação com funcionamentos anómalos	Excesso de temperatura no IRS potencializando degradação prematura, eventual paragem do sistema de reconstrução	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Nível II
IES (avaliação imagem)	03.02	Adquirir e visualizar as imagens dos exames	Falha de <i>software</i>	03.02.01	<i>Software</i> corrompido Má qualidade de energia elétrica	Sistema de imagem não inicia normalmente Impossibilidade de reconstrução de imagens	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico
			Falha da fonte de alimentação	03.02.02	Temperatura elevada na sala Ventilação da torre avariada ou eventualmente com filtros colmatados. Distorção harmónica (má qualidade de energia elétrica)	Computador do IES desliga-se	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico
			Falha nos discos de armazenamento de dados	03.02.03	Discos sem disponibilidade de espaço livre para armazenamento de dados Dados corrompidos	Informação aos exames inacessível	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico

Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
ICS (controlo principal da TC)	03.03	Visualizar imagens, tratar os dados processados e criar reconstruções 3D. (Estação de trabalho primária)	Falha de <i>software</i>	03.03.01	<i>Software</i> corrompido Má qualidade de energia elétrica	Sistema de imagem não inicia normalmente Impossibilidade de reconstrução de imagens	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico
			Falha da fonte de alimentação	03.03.02	Temperatura elevada na sala Ventilação da torre avariada ou eventualmente com filtros colmatados. Distorção harmónica (má qualidade de energia elétrica)	Computador do ICS desliga-se	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico
			Falha nos discos de armazenamento de dados	03.03.03	Discos sem disponibilidade de espaço livre para armazenamento de dados Dados corrompidos	Informação aos exames inacessível	Funcionais: Não Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Não Crítico

FMEA nº: 1
 Data: 25/07/2018
 Equipamento: TC Siemens Somatom Definition Flash
 Sistema: PHS

Código Equipamento: TC
 Código do Sistema: 04

FMEA								
Subsistema	Código subsistema	Função do subsistema	MDF funcionais	Código MDF	Causa do MDF	Efeito do MDF	Consequências do MDF	Nível de criticidade
LMAS2 (Master control)	04.01	Controlar sincronizar e gerir todos os periféricos da mesa	Falha de transmissão de sinais de controlo	04.01.01	Módulos de transmissão de sinal (Rx, Tx), cabos ou conetores dos cabos avariados	Falha de sincronismo nos movimentos da mesa durante a aquisição. Repetição de exame	Funcionais: Sim Segurança: Sim, repetição exame Económicas: Sim	Nível II
			Falha de interface com periféricos	04.01.02	Eventuais cabos ou conetores avariados <i>Encoder</i> descalibrado Sensores de posição avariados	Movimentos da mesa com restrições	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Nível II
			Controlo do sistema da mesa bloqueado	04.01.03	<i>Firmware</i> corrompido	Mesa pára	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Possivelmente	Nível II
PMM (Módulo medições fisiológicas)	04.02	Monitorizar os batimentos cardíacos para sincronizá-los com a emissão de radiação	Falha na monitorização da pulsação do doente	04.02.01	Envelhecimento ou desgaste dos elétrodos (cinta à volta do tórax)	Impossibilidade de efetuar sincronização com os batimentos cardíacos do coração	Funcionais: Sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
Controlo movimentos verticais	04.03	Controlar os movimentos verticais da mesa para ajustar a posição do doente	Paragem do movimento vertical da mesa	04.03.01	Falha da placa de comando para realização dos movimentos verticais	Impossibilidade de ajustar a altura da mesa com a <i>gantry</i>	Funcionais: Possivelmente Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
Controlo movimentos horizontais	04.04	Controlar os movimentos horizontais da mesa para ajustar a posição do doente	Paragem do movimento horizontal da mesa	04.04.01	Falha da placa de comando para realização dos movimentos horizontais	Impossibilidade de efetuar exames que careçam de movimentos horizontais da mesa	Funcionais: Possivelmente Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II
			Intermitências no movimento horizontal da mesa	04.04.02	Sujidade e/ou impurezas nos carris da mesa	Artefatos de imagem (<i>stripes</i>)	Funcionais: Sim Segurança: Sim Económicas: Possivelmente só MDO	Nível II
PHS (Modulo alimentação)	04.05	Alimentar eletricamente os periféricos da mesa	Mesa sem alimentação elétrica	04.05.01	Módulo eletrónico PHS em avaria	Mesa imobilizada	Funcionais: sim Segurança: Não Económicas: Sim	Nível II

Anexo 4 – Diagrama de Decisão RCM

Diagrama de Decisão						Ação	Periodicidade
Código MDF	Os efeitos da falha são evidentes para os operadores em condições normais de trabalho? (falhas ocultas)	Modo de falha progressiva (P) ou casual (C)?	A falha é sinalizada por meios automáticos? (antes da falha acontecer)	Caminho dos fluxogramas	Política de manutenção recomendada		
01.01.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da unidade eletrónica RAC-Power	
01.01.02	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da unidade eletrónica Fil-Power	
01.02.01	Não	P	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Substituição do HVT	
01.02.02	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Substituição do HVT	
01.02.03	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Substituição do HVT	
01.03.01	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica das Escovas	Anual
01.03.02	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica das Escovas	Anual
01.04.01	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.02	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.03	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.04	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.05	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.06	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.04.07	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,11	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Substituição Periódica da Ampola, se o custo da ampola for moderado, caso seja elevado MC será a melhor política	1700 minutos de irradiação
01.05.01	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da unidade eletrónica XDC e realizar testes de calibração Eventual troca de ampola	

Diagrama de Decisão						Ação	Periodicidade
Código MDF	Os efeitos da falha são evidentes para os operadores em condições normais de trabalho? (falhas ocultas)	Modo de falha progressiva (P) ou casual (C)?	A falha é sinalizada por meios automáticos? (antes da falha acontecer)	Caminho dos fluxogramas	Política de manutenção recomendada		
01.06.01	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Verificar qualidade de serviço do circuito secundário Substituição de permutador e eventual reforço de permuta ou refrigeração do secundário	
01.07.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Confirmar o estado dos módulos de transmissão de sinal, cabos ou conetores dos cabos, eventual substituição	
01.07.02	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Verificar estados das ligações e comunicações com os periféricos, eventual substituição da UMAR	
01.07.03	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Reinstalação / atualização de <i>firmware</i>	
01.08.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Confirmação do estado da cablagem e dos apertos dinamométricos dos conetores, eventual substituição dos mesmos Verificação do estado das proteções elétricas, eventual substituição	
01.09.01	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Eventual substituição de módulos de transmissão de sinal, cabos ou conetores dos cabos	
01.09.02	Não	P	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Calibração dos detetores, eventual substituição de matrizes	
01.09.03	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Calibração dos detetores, eventual substituição de matrizes	
01.09.04	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da fonte de alimentação do DMS	
02.01.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Confirmação do estado da cablagem e dos apertos dinamométricos dos conetores, eventual substituição dos mesmos Verificação do estado das proteções elétricas, eventual substituição	
02.02.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Confirmar o estado dos módulos de transmissão de sinal, cabos ou conetores dos cabos, eventual substituição	
02.02.02	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Verificar estados das ligações e comunicações com os periféricos, eventual substituição da UMAS	
02.02.03	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Reinstalação / atualização de <i>firmware</i>	

Diagrama de Decisão						Ação	Periodicidade
Código MDF	Os efeitos da falha são evidentes para os operadores em condições normais de trabalho? (falhas ocultas)	Modo de falha progressiva (P) ou casual (C)?	A falha é sinalizada por meios automáticos? (antes da falha acontecer)	Caminho dos fluxogramas	Política de manutenção recomendada		
02.03.01	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Verificar estado das escovas do <i>slipring</i> , possível necessidade de substituição Verificar valores de tensão do MVT, possível necessidade de substituição do MVT Solicitar análise de qualidade de energia da rede	
02.03.02	Sim	P	Sim	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Eventual necessidade de substituição do MVT Analisar carga solicitada, tempo de duração de exames	
02.03.03	Sim	P	Sim	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Eventual necessidade de substituição do MVT Analisar carga solicitada, tempo de duração de exames	
02.03.04	Sim	P	Sim	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Substituição do MVT	
02.04.01	Não	C	Não	1,14,18,19,20,21,22	MC - Manutenção Corretiva	Substituição de XGS	
03.01.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Eventual substituição de módulos de transmissão de sinal, cabos ou conetores dos cabos	
03.01.02	Sim	P	Sim	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Remover dados para disco externo, propor ao cliente uma solução de armazenamento de dados externa	
03.01.03	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Verificar temperatura do local de instalação do IRS Limpeza de filtros e eventual substituição de ventiladores de extração de ar Eventual substituição da fonte de alimentação e algum <i>hardware</i> danificado	
03.01.04	Sim	P	Não	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Verificar temperatura do local de instalação do IRS Limpeza de filtros e eventual substituição de ventiladores de extração de ar Eventual substituição da fonte de alimentação	
03.02.01	Sim	C	Não	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Reinstalação / atualização de <i>software</i> Propor análise de qualidade de energia	

Diagrama de Decisão						Ação	Periodicidade
Código MDF	Os efeitos da falha são evidentes para os operadores em condições normais de trabalho? (falhas ocultas)	Modo de falha progressiva (P) ou casual (C)?	A falha é sinalizada por meios automáticos? (antes da falha acontecer)	Caminho dos fluxogramas	Política de manutenção recomendada		
03.02.02	Sim	C	Não	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Verificar temperatura do local de instalação do IES Limpeza de filtros e eventual substituição de ventiladores de extração de ar Eventual substituição da fonte de alimentação, propor análise de qualidade de energia	
03.02.03	Sim	P	Sim	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Remover dados para disco externo, propor ao cliente uma solução de armazenamento de dados externa	
03.03.01	Sim	C	Não	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Reinstalação / atualização de <i>software</i> Propor análise de qualidade de energia	
03.03.02	Sim	C	Não	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Verificar temperatura do local de instalação do IES Limpeza de filtros e eventual substituição de ventiladores de extração de ar Eventual substituição da fonte de alimentação, propor análise de qualidade de energia	
03.03.03	Sim	P	Sim	1,2,7,13	MC - Manutenção Corretiva	Remover dados para disco externo, propor ao cliente uma solução de armazenamento de dados externa	
04.01.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Eventual substituição de módulos de transmissão de sinal, cabos ou conetores dos cabos	
04.01.02	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição de cabo ou conector Calibração do <i>Encoder</i> Substituição de sensores de posição	
04.01.03	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Reinstalação / atualização de <i>firmware</i>	
04.02.01	Sim	P	Sim	1,2,7,8,9,10,12	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da cinta de elétrodos	
04.03.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição da unidade eletrónica de comando " <i>vertical drive</i> "	
04.04.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição das unidades eletrónicas de comando " <i>top suport drive</i> " + " <i>table top drive</i> "	
04.04.02	Não	P	Não	1,14,18,19,20	MPS - Manutenção Preventiva Sistemática	Limpeza Periódica dos carris da mesa	Anual
04.05.01	Sim	C	Não	1,2,7,8	MC - Manutenção Corretiva	Substituição do módulo eletrónico PHS	

Anexo 5 – Recolha e Ajustamento de Dados dos MDF

UCS	Datas de Falha	MDF	TTF (minutos)	TTFacum. (minutos)	Censuras	Notas
1	01/08/2007	Arcos	839	839	-	-
1	19/01/2008	Arcos	1164	2004	-	-
1	25/03/2008	Filamento	533	2536	-	-
1	17/06/2008	Arcos	349	2885	-	-
1	20/08/2010	Ânodo ruidoso	6922	9807	-	-
1	24/06/2011	Ânodo ruidoso	2748	12555	-	-
1	16/04/2012	Arcos	2594	15149	-	-
1	06/02/2014	Ânodo ruidoso	6355	21504	-	-
1	14/08/2015	Filamento	4992	26495	-	-
1	28/08/2018	-	8205	34700	S	Em funcionamento
2	07/05/2018	Arcos	4289	4289	-	-
2	29/08/2018	-	514	4803	S	Em funcionamento
3	04/08/2011	Arcos	9169	9169	-	-
3	19/03/2012	Arcos	2336	11505	-	-
3	13/03/2014	Arcos	8296	19801	-	-
3	17/05/2018	Filamento	10253	30055	-	-
3	28/08/2018	-	400	30455	S	Em funcionamento
4	11/10/2010	Arcos	2255	2255	-	-
4	05/09/2011	Ânodo ruidoso	2198	4453	-	-
4	10/10/2011	Arcos	215	4668	-	-
4	30/12/2014	Ânodo ruidoso	8575	13243	-	-
4	28/08/2018	-	11097	24340	S	Em funcionamento
5	11/06/2018	Filamento	4395	4395	-	-
5	29/08/2018	-	878	5273	S	Em funcionamento
6	12/02/2016	Filamento	4128	4128	-	-
6	11/11/2016	Arcos	1559	5687	-	-
6	19/07/2018	Arcos	4000	9688	-	-
6	29/08/2018	-	247	9934	S	Em funcionamento
7	29/08/2018	-	197	197	S	Em funcionamento

Nota: A unidade dos TTF são referentes ao tempo de emissão de radiação (irradiação) das ampolas.
Considerou-se para o estudo a unidade de tempo em minutos.

Anexo 6 – Valor crítico para o teste de KS (n.s.=5%)

Dimensão da amostra	Valor do D_{cr} ; com $\alpha = 0,05$
1	0,975
2	0,842
3	0,708
4	0,624
5	0,454
6	0,521
7	0,486
8	0,457
9	0,432
10	0,410
11	0,391
12	0,375
13	0,361
14	0,349
15	0,338
16	0,328
17	0,318
18	0,309
19	0,301
20	0,294
21	0,289
22	0,284
23	0,279
24	0,274
25	0,270
26	0,264
27	0,258
28	0,252
29	0,246
30	0,240
31	0,238
32	0,236
33	0,234
34	0,232
> 35	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$

Anexo 7 – Valor crítico para o teste de QQ (n.s.=5%)

Valor de n	Valor do χ_{cr}^2 ; com $\alpha = 0,05$
1	3,8415
2	5,9915
3	7,8147
4	9,4877
5	11,0705
6	12,5916
7	14,0671
8	15,5073
9	16,9189
10	18,307
11	19,6752
12	21,0261
13	22,3621
14	23,6848
15	24,9958
16	26,2963
17	27,5872
18	28,8693
19	30,1436
20	31,4104

