



João Carlos Mourão Rato

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Gestão da Manutenção da Frota das UQE-S2300

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Doutor José António Mendonça Dias,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Eng.º Rui Américo Rodrigues Sabino,
Director do Parque Oficinal Sul, EMEF

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Virgínia Helena Arimateia de Campos Machado

Arguente: Prof. Doutor José Augusto Silva Sobral

Vogal: Prof. Doutor José António Mendonça Dias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2013

Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Gestão da Manutenção da Frota das UQE-
S2300**

João Carlos Mourão Rato

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Doutor José António Mendonça Dias, Professor Auxiliar, Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Eng.º Rui Américo Rodrigues Sabino, Director do Parque Oficinal Sul,
EMEF

Março 2013

Gestão da Manutenção da Frota das UQE-S2300

Copyright © 2013 João Carlos Mourão Rato

Faculdade de Ciências e Tecnologia,

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A presente dissertação encontra-se redigida ao abrigo do antigo Acordo Ortográfico.

*À minha Família pelo apoio
incondicional*

Agradecimentos

Antes de mais, gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para o desenvolvimento da presente dissertação.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor Doutor José Mendonça Dias, que na condição de orientador académico, demonstrou ser uma preciosa ajuda ao longo das diversas fases de desenvolvimento da presente dissertação. Com isto, refiro-me à óptima orientação científica demonstrada, assim como às valiosas sugestões referentes a oportunidades de análise de investigação. Agradeço ainda pela sua total disponibilidade e igualmente pela motivação evidenciada em momentos vividos com maior dificuldade.

Em segundo lugar, e não menos importante, um agradecimento à Direcção da EMEF pela oportunidade de realização do estágio curricular e conseqüentemente do presente estudo. Uma palavra de apreço igualmente à divisão de Recursos Humanos, na pessoa do psicólogo Carlos Barreto Campos, que tendo sido o primeiro contacto dentro da empresa, serviu de elo de ligação entre ambas as partes.

Agradece-se igualmente à equipa de Engenharia da Oficina de Manutenção de Material de Campolide, começando pelo orientador na organização, Eng.º João Maia Pires, ao qual se deixa uma palavra de respeito e homenagem por todo o apoio, empenho e preocupação demonstrada a nível de esclarecimento de dúvidas e curiosidades. Por sua vez, uma palavra de apreço ao Director Rui Rodrigues Sabino, que sendo igualmente orientador na organização, proporcionou todo o apoio e interesse à concretização do presente estudo.

Ainda que por vezes em momentos de muito trabalho, agradece-se verdadeiramente ao Eng.º Paulo Neves e Eng.º Jorge Campos pela motivação, troca de sugestões e disponibilidade para fornecimento de informações fundamentais à realização do estudo.

Um agradecimento em particular ao Sr.º Carlos Bartolomeu – técnico de eléctrica, e ao Sr.º João Marchão – técnico de mecânica, por toda a paciência, disponibilidade e partilha dos seus elevados conhecimentos, mesmo em horários apertados de muito trabalho.

Um obrigado aos restantes elementos que integram a equipa da referida oficina pelos conhecimentos partilhados e simpatia demonstrada.

Agradeço a todos os meus colegas de curso e amigos da FCT-UNL pelo espírito de entajuda e cooperação nas mais diversas situações e pelo convívio proporcionado. Entre eles gostaria de destacar o Diogo Alves, Gustavo Lopes, Jorge Marques, Pedro Coelho, José Miguel Santos, João Santos, João Salgado, Gonçalo Ferreira, Rui Simões, Pedro Antunes e Pedro Rito.

Um agradecimento muito especial e sentido ao meu amigo António Furtado pelo apoio, momentos de convívio e experiências partilhadas ao longo do meu percurso académico.

Por fim, mas de forma alguma com menor importância, um forte agradecimento do fundo do coração à minha família, nomeadamente aos meus pais e irmão, assim como a todos meus os amigos pelo carinho, apoio e motivação facultados ao longo da minha vida. Uma palavra igualmente de gratidão pela compreensão aferida em todos os momentos privados da sua companhia.

Obrigado.

Resumo

A gestão da manutenção ferroviária apresenta-se actualmente e mais do que nunca como uma actividade estratégica para o desempenho eficaz e eficiente das organizações, possibilitando a estas benefícios de confiança, flexibilidade e redução de custos, representativos por sua vez no conforto, segurança e rapidez do serviço prestado ao utilizador.

Na presente dissertação é apresentada uma análise de fiabilidade e gestão da manutenção aplicada a uma frota de 42 automotoras UQE-S2300 pertencentes à CP, que por sua vez se encontra à responsabilidade da EMEF no que respeita a operações de manutenção.

Através da investigação prática pretende-se avaliar numa primeira fase e em contexto de sistema reparável a tendência das automotoras, de forma individual e global, em termos de fiabilidade, recorrendo-se desse modo a conceitos de processos estocásticos pontuais e à estatística do teste de *Laplace*. Para isso, recorreu-se a registos históricos das avarias de material e manutenção, conducentes a um determinado período de tempo. A identificação dos sistemas mais críticos da frota de automotoras, isto é, aqueles que apresentam um maior risco de falha, são um outro objectivo do presente estudo, tendo-se recorrido nesse sentido ao Princípio de Pareto.

No que respeita a indicadores de desempenho, apresenta-se nesta primeira análise uma caracterização do comportamento médio da frota com base no indicador MTBF (*Mean Time Between Failures*), perspectivando um cenário de comparação para a segunda fase do estudo. Nesta, pretende-se analisar o benefício obtido em termos de incremento provocado no MTBF médio da frota, resultante da implementação do que se julgam ser as melhores soluções práticas para cada um dos sistemas críticos previamente identificados.

Palavras – Chave: Gestão da Manutenção, Análise de Fiabilidade, Sistema Reparável, Teste de *Laplace*, MTBF (*Mean Time Between Failures*), Sistemas Críticos.

Abstract

Nowadays, the railway maintenance management presents itself more than ever as a strategic activity for the effective and efficient performance of organizations, allowing benefits of confidence, flexibility and costs reduction, at the same time that represents comfort, safety and rapidity in the service provided to the user.

This thesis presents an analysis of reliability and maintenance management applied to a fleet of 42 railcars UQE-S2300 that belongs to the CP enterprise. In its turn EMEF enterprise is responsible by the maintenance actions of these railcars.

Initially the practical study intended to evaluate individually and globally the railcars trend in a repairable system context, in order to analyze the reliability. Thus, it is used the concept of stochastic point processes and the statistic Laplace test. This study was based on a historical record of material failures and maintenance for a given period of time. Another goal of this study involves the identification of the most critical systems fleet or railcars, i.e., those who having a higher risk of failure. In order to find it, it was used the Pareto Principle.

In this first analysis it is also presented a characterization of the behavior of the average fleet based on MTBF indicator (Mean Time Between Failures), which will be compared in a new scenario in the second phase of this study. It is intended to analyze in this phase the benefit obtained in terms of increase caused in the average fleet MTBF, resulting from the implementation of what are judged to be the best practical solutions for each one of the critical systems previously identified.

Keywords: Maintenance Management, Analysis of Reliability, Repairable System, Laplace Test, MTBF (Mean Time Between Failures), Critical Systems.

Índice de Matérias

PARTE I – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	1
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Âmbito	2
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura da Dissertação	4
CAPÍTULO 2 – MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. A Empresa – EMEF	7
2.2.1. Estrutura Organizacional	9
2.2.2. Áreas de Actividade	9
2.3. Manutenção.....	16
2.3.1. Evolução Histórica	17
2.3.2. Metodologia RCM	18
2.3.3. Estratégias e Tipos de Manutenção	19
2.3.4. Indicadores de Desempenho da Gestão da Manutenção	22
2.3.5. Plano de Manutenção Preventiva da EMEF	23
2.4. Fiabilidade	26
2.4.1. A Importância da Fiabilidade neste Sector	30
CAPÍTULO 3 – ESTATÍSTICA DAS FALHAS	33
3.1. Introdução.....	33
3.2. Análise de Sobrevivência	33
3.3. Análise Estatística das Falhas	35

3.3.1. Estimador não Paramétrico da Função de Fiabilidade	36
3.3.2. Distribuição de <i>Weibull</i>	37
3.4. Sistemas Reparáveis	39
3.4.1. Tendência dos Dados	40
3.4.2. Teste de <i>Laplace</i>	44
PARTE II – DESENVOLVIMENTOS PRÁTICOS.....	47
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA GLOBAL DA FROTA.....	47
4.1. Bem Reparável em Estudo	47
4.2. Estrutura da Informação em Análise	50
4.3. Análise Estatística Global das Falhas	54
4.3.1. Evolução da Taxa de Falhas de cada Automotora.....	54
4.3.2. Análise das Falhas da Frota – Identificação dos Bens Críticos	61
CAPÍTULO 5 – CENÁRIO PROPOSTO: ESTUDO DO NOVO MTBF MÉDIO DA FROTA.....	67
5.1. Introdução.....	67
5.2. Descrição dos Bens Críticos	67
5.3. Pressupostos Considerados	72
5.4. Cálculo do MTBF Médio da Frota	75
5.5. Disponibilidade Operacional da Frota	82
PARTE III – CONCLUSÕES GERAIS	85
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES GERAIS	85
6.1. Conclusões.....	85
6.2. Propostas para Trabalhos Futuros.....	89
BIBLIOGRAFIA	91
APÊNDICES	95

Apêndice A1 – Síntese dos parâmetros das automotoras, necessários à aplicação do teste de <i>Laplace</i>	97
Apêndice A2 – Representação gráfica dos testes de <i>Laplace</i> das automotoras. ..	103
Apêndice A3 – Dados necessários à estimativa dos MTBF, MTBF mínimos garantidos e intervalos de confiança das automotoras.....	117
Apêndice A4 – Gráfico da ocorrência das falhas da frota de UQE S2300.	127
Apêndice A5 – Tabelas e diagramas de Pareto dos sistemas e subsistemas da frota	129
Apêndice B1 – Tabela com tempos de vida considerados e tempos de vida excluídos (<i>outliers</i>) do LRU <i>Gate Unit</i>	133
ANEXOS	135
Anexo B – Tabelas de constantes do Método de <i>Crow</i>	137
Anexo C – Tabela da Distribuição Normal	139
Anexo D – Sistema de Classificação de Avarias e Incidentes (SCAI).....	141

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Organograma representativo da estrutura organizacional da EMEF.	10
Figura 2.2 – Áreas de actividade da EMEF.	11
Figura 2.3 – Automotora S2300 antes (esquerda) e depois (direita) da R2.	12
Figura 2.4 – Classificação das diversas políticas de manutenção.	20
Figura 2.5 – Constituição do PMP adoptado nas automotoras S2300.	23
Figura 2.6 – Divisão das IT em secções e respectiva subdivisão destas em PT.	26
Figura 2.7 – Sistema com componentes em série.	27
Figura 2.8 – Sistema com componentes em paralelo.	28
Figura 2.9 – Sistema de comutação de componentes.	29
Figura 3.1 – Informação censurada.	35
Figura 3.2 – Evolução da F.d.p. da distribuição de Weibull para diversos valores de β	35
Figura 3.3 – Curva da banheira.	39
Figura 4.1 – Oficina de Manutenção de Material da EMEF, em Campolide.	47
Figura 4.2 – Automotora S2300.	48
Figura 4.3 – Rede das linhas férreas, alvo de circulação das automotoras S2300.	48
Figura 4.4 – Constituição física da UQE 2301.	49
Figura 4.5 – Exemplo da listagem de informação na plataforma <i>InfoTec</i>	51
Figura 4.6 – Diagrama de <i>Gantt</i> das automotoras que não permaneceram em serviço comercial durante os 851 dias de observação.	55
Figura 4.7 – Representação gráfica do teste de <i>Laplace</i> para a UQE 2303.	56
Figura 4.8 – Representação gráfica do teste de <i>Laplace</i> para a UQE 2312.	58
Figura 4.9 – Representação gráfica do teste de <i>Laplace</i> da Frota de UQE S2300.	61
Figura 4.10 – Diagrama de Pareto dos grupos de sistemas da frota.	63

Figura 4.11 – Diagrama de Pareto dos LRU pertencentes aos subsistemas críticos da frota. ..	65
Figura 5.1 – LRU Gate Unit utilizada nas UQE S2300 (vista frontal).	77
Figura 5.2 – LRU GTO utilizado nas UQE S2300 (vista frontal).	68
Figura 5.3 – Posição física dos LRU <i>Gate Unit</i> utilizadas nas UQE S2300 (vista de cima).....	70
Figura 5.4 – LRU Comando de Limpa Vidros utilizado nas UQE S2300 (vista lateral e frontal).71	
Figura 5.5 – LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico utilizado nas UQE S2300 (vista de baixo).....	71
Figura 5.6 – LRU Cartas de Entradas/Saídas – E/S utilizado nas UQE S2300 (vista frontal e lateral).....	72
Figura 5.7 – <i>RACK</i> do LRU Carta de Entradas e Saídas – E/S (vista frontal).	72
Figura 5.8 – Sucessivas reengenharias do LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico (vista frontal).....	74
Figura 5.9 – Ajustamento dos tempos de vida do LRU <i>Gate Unit</i> através de método não paramétrico.....	77
Figura 5.10 – Periodicidade de manutenção preventiva obtida para o LRU <i>Gate Unit</i>	77
Figura 5.11 – Funções Densidade e Distribuição de probabilidade do LRU <i>Gate Unit</i>	77
Figura 5.12 – Disposição em série dos LRU <i>Gates Unit</i>	77
Figura 5.13 – Disposição em paralelo dos 4 grupos de tracção da UQE.	79
Figura 5.14 – Evolução do MTBF médio da Frota em ambos os cenários.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Oficinas de manutenção abrangidas pelos actuais PO e respectivas localizações.	9
Tabela 2.2 – Tipos de revisão de manutenção pesada das automotoras S2300.	12
Tabela 2.3 – Atribuição do material circulante a cada GO para efeitos de manutenção pesada.	13
Tabela 2.4 – Atribuição do material circulante a cada oficina de manutenção para efeitos de manutenção de linha.	14
Tabela 2.5 – Tipos de visita de manutenção de linha das automotoras S2300.	14
Tabela 4.1 – Síntese dos parâmetros da UQE 2303, necessários à aplicação do teste de <i>Laplace</i> .	56
Tabela 4.2 – Dados da UQE 2303 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.	57
Tabela 4.3 – Síntese dos parâmetros da UQE 2312, necessários à aplicação do teste de <i>Laplace</i> .	57
Tabela 4.4 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2312.	58
Tabela 4.5 – Resumo dos indicadores de desempenho da frota de automotoras.	60
Tabela 4.6 – Síntese dos parâmetros da Frota, necessários à aplicação do teste de <i>Laplace</i> .	61
Tabela 4.7 – Número de falhas ocorridas por grupo de sistemas e respectivo percentual acumulado.	62
Tabela 4.8 – Número de falhas ocorridas por LRU e respectivo percentual acumulado.	64
Tabela 5.1 – Taxa de falhas dos LRU Cartas de Entradas/Saídas e Comando de Limpa Vidros.	73
Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros de forma e escala estimados para o LRU <i>Gate Unit</i> .	76
Tabela 5.3 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Comando de Limpa Vidros.	80
Tabela 5.4 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Cartas de Entrada/Saídas – E/S.	80

Tabela 5.5 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico.	81
Tabela 5.6 – Incremento no MTBF médio da frota.	81
Tabela 5.7 – Disponibilidade Operacional da frota.	83

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Estabelecimentos oficiais de manutenção integrantes da EMEF em 1994.....	8
Quadro 4.1 – Características técnicas das UQE S2300.....	50
Quadro 5.1 – Resumo dos pressupostos considerados para o cenário proposto.....	74

Abreviaturas

APCER – Associação Portuguesa de Certificação

CP – Comboios de Portugal

CPA – Comboios de Pendulação Activa

CM – Ciclo de Manutenção

DIEF – Departamento de Inovação e Engenharia Ferroviária

D_{OP} – Disponibilidade Operacional

EMEF – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário

GFF – Grupo Oficinal da Figueira da Foz

GOB – Grupo Oficinal do Barreiro

GOE – Grupo Oficinal do Entroncamento

GOP – Grupo Oficinal do Porto

GTO – *Gate Turn Off*

IPAC – Instituto Português de Acreditação

IS – Inspeção de Serviço

IT – Instruções de Trabalho

LCL – *Low Control Limit*

LED – *Light Emitting Diode*

LRU – *Line Replacement Unit*

MC – Manutenção do Centro

MMM – Manutenção de Material e Mercadorias

MN – Manutenção do Norte

ML – Manutenção de Lisboa

MLE – *Maximum Likelihood Estimation*

MS – Manutenção do Sul

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTBR – *Mean Time Between Repair*

MTBR_{OP} – *Mean Time Between Repair Operacional*

MTTF – *Mean Time To Fail*

MTTR – *Mean Time To Repair*

MTTR_{OP} – *Mean Time To Repair Operacional*

MY – Unidade Motora

OMMC – Oficina de Manutenção de Material de Campolide

PHM – *Proportional Hazards Modeling*

PMP – Plano de Manutenção Preventiva

PO – Parque Oficinal

PPH/PPNH – Processo de *Poisson* Homogéneo/ Não Homogéneo

PQ – Plano da Qualidade

PT – Posto de Trabalho

R1/R2 – Revisão de Nível 1/2

RCM – *Reliability Centered Maintenance*

REFER – Rede Ferroviária Nacional

ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*

RY – Unidade Reboque

S2300 – Série 2300

SCAI – Sistema de Classificação de Avarias e Incidentes

SGQ – Sistema de Gestão da Qualidade

SQ – Sistema da Qualidade

SR/SNR – Sistema Reparável/Não Reparável

TNS – Trabalho Não Sistemático

TPM – *Total Productive Maintenance*

TTR – *Time To Repair*

UCC – Unidade Central de Comando

UCL – *Up Control Limit*

UCT – Unidade Central de Tracção

UIC – União Internacional de Caminhos de Ferro

UQE – Unidade Quádrupla Eléctrica

UMAV – Unidade de Manutenção de Alta Velocidade

UNP – Unidade de Novos Projectos

V1/V2/V3/V4/V5 – Visita de Nível 1/2/3/4/5

VAC – Visita por Acidente

VAN – Visita por Vandalismo

VAV – Visita por Avaria

Simbologia

Km – Quilómetro

ton – Tonelada

m – Metro

Hz – Hertz

kV – Kilo-Volt

kA – Kilo-Ampere

$H_0/H1$ – Hipótese Nula/Hipótese Alternativa

p – Probabilidade de Falha

Z_0 – Estatística de Teste

$\hat{\theta}$ – *Mean Time Between Failures*

T – Tempo de Duração do Ensaio

n_f – Número de Falhas

θ_i – MTBF Mínimo

α – Nível de Significância

λ – Taxa de Talhas

n – Dimensão da Amostra

p – Probabilidade de Sucesso

q – Probabilidade de Insucesso

x – Bens em Funcionamento

m – Número Mínimo de bens em Funcionamento

\tilde{t} – Intervalo de Tempo Censurado

$R(t)$ – Função de Fiabilidade

$F(t)$ – Função de Distribuição Cumulativa

$f(t)$ – Função Densidade de Probabilidade

$h(t)$ – Função de Risco

n_j – Bens em Risco de experimentarem a Falha

d_i – Número de bens que experimentaram a Falha

$\rho(\tau)$ – Taxa de Falhas do Modelo de *Crow*

Δt – Intervalo de Tempo

m – Valor Médio da Distribuição de *Poisson*

W – Periodicidade de Intervenção Preventiva

L – função de máxima verosimilhança

Parte I

Capítulo 1

Introdução

- 1. Âmbito**
- 2. Objectivos**
- 3. Metodologia**
- 4. Estrutura da Dissertação**

Com o aumento da globalização económica e comercial durante a primeira década do século XXI, devido em grande parte à quebra de barreiras comerciais e liberalização de mercados, a competitividade surge junto das empresas como um factor de diferenciação.

De acordo com Profillidis (2006), este factor passa por garantir no sector dos transportes em específico que pessoas e mercadorias sejam transportadas de forma rápida, cómoda e segura, ao mais baixo custo possível. Nesse sentido, o transporte ferroviário surge como uma boa aposta apresentando diversas vantagens face a outros meios de transporte, nomeadamente a movimentação em massa de pessoas e mercadorias para longas distâncias de forma rápida, evitando situações de congestionamento, assim como o comodismo e segurança proporcionado. Segundo o autor, assiste-se ainda a um consumo inferior de energia quando comparado com o sector rodoviário (cerca de 1/3) ou aeronáutico (cerca de 1/5).

Com o intuito de proporcionar ao cliente um transporte fiável e seguro, paralelamente em vista à obtenção de vantagem competitiva, as empresas têm vindo a demonstrar gradualmente o interesse em apostar na análise de estratégias de fiabilidade e gestão da manutenção. Isto porque segundo Waeyenbergh & Pintelon (2002), a adopção de políticas de manutenção adequadas não só contribuem para manter o custo do ciclo de vida do sistema reduzido como contribuem positivamente para o desempenho global da organização. Deste modo, a manutenção apresenta-se como um factor potencial gerador de lucro para as organizações, levando as mesmas a reconhecerem cada vez mais esta área como uma parte integrada do conceito de negócio.

Os estudos estatísticos de fiabilidade ganham igualmente relevância para as organizações na medida em que através destes é possível quantificar, ao longo do tempo, o desempenho apresentado pelos sistemas. No caso dos sistemas se tratarem de transportes, esta questão implica na sua grande maioria que determinados requisitos sejam cumpridos, assistindo-se por

vezes a uma predominância de requisitos de fiabilidade face a requisitos de desempenho. A título de exemplo, os sectores ferroviário e aeronáutico exemplificam essa mesma situação (Assis, 2004).

1.1. Âmbito

Em função de uma oportunidade de estágio de natureza curricular, foi possível entrar em contacto com a realidade empresarial de uma empresa de manutenção ferroviária, reconhecida nacional e internacionalmente pelos seus serviços prestados, a EMEF S.A – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário.

Apresentando diversas oficinas espalhadas por território nacional, a realização da presente dissertação teve lugar na Oficina de Manutenção de Material de Campolide (OMMC).

Inserido na área da Fiabilidade e no âmbito de aplicação à Gestão da Manutenção, o presente estudo tem como foco de incidência uma das frotas da responsabilidade da referida oficina, a frota de automotoras eléctricas da série 2300/2400. Tendo sido apresentada inicialmente uma proposta junto da empresa, esta viria a sofrer um pequeno desvio do seu rumo aquando da evolução do projecto, como será percepcionado no subcapítulo seguinte.

1.2. Objectivos

Conducente à dissertação de Mestrado, o presente projecto apresenta dois objectivos principais, sendo que o primeiro traduz-se na finalização e respectivo acesso ao grau académico a que me proponho. Dado que o projecto foi realizado numa empresa, o segundo objectivo consiste na aplicação de conhecimentos académicos adquiridos, que vão de encontro às necessidades identificadas pela mesma, possibilitando deste modo o desenvolvimento de um trabalho de valor acrescentado dentro do âmbito considerado.

Inicialmente foi proposto à empresa desenvolver-se um estudo da fiabilidade de serviço da frota de automotoras da S2300/2400, que permitisse avaliar se a fiabilidade seria afectada por factores críticos relacionados com a taxa de falhas dos sistemas que integram as automotoras.

Deste modo, pretendia-se numa primeira fase analisar em contexto de sistemas reparáveis as automotoras, tanto em termos individuais como colectivo (frota), procedendo-se à caracterização das suas taxas de falha. Numa fase posterior pretendia-se identificar os sistemas críticos, isto é, dos sistemas que registam mais ocorrências de falhas, com o intuito de propor um plano de manutenção preventiva para os mesmos. De forma a modelar este plano assim como conhecer o risco associado a cada um desses sistemas, permitindo colocar

em prática acções de manutenção adequadas, sugeriu-se como metodologia de análise estatística a aplicação do Modelo de Riscos Proporcionais, conhecido igualmente por *Proportional Hazards Modeling* (PHM). É nesta última fase do estudo que a proposta inicial viria a sofrer um ligeiro desvio do seu rumo, caindo por terra a análise baseada no PHM, em detrimento de uma nova proposta sugerida pela empresa.

Dito isto, analisando apenas a frota de automotoras da S2300 e perspectivando que esta apresenta uma taxa de falhas constante, pretende-se agora analisar qual será o benefício obtido em termos de MTBF¹ médio da frota, sabendo que o nível da taxa de falhas é reduzido para um patamar inferior como resultado de soluções propostas para os sistemas críticos, que se julga serem as mais adequadas.

1.3. Metodologia

De forma a atingir os objectivos propostos anteriormente, adoptou-se uma metodologia que tem como base a combinação de forma integrada dos conceitos de fiabilidade e gestão da manutenção. Nesse sentido, começou-se por fazer um levantamento bibliográfico do estado de arte relativo não só a estes conceitos como também a outros associados ao tema apresentado.

A nível de desenvolvimentos práticos, estes encontram-se divididos em duas grandes etapas. A primeira envolve como ponto de partida a criação de uma base de dados através da ferramenta *Microsoft Office Excel*, relativa às falhas imputáveis à empresa, ou seja, falhas directamente relacionadas com a manutenção, registadas nas 42 automotoras que integram a frota da S2300.

Com o intuito de facilitar a modelação dos dados, a base de dados inicial encontra-se repartida por automotora, existindo desse modo 42 bases de dados independentes. Entre diversas informações, estas incluem a data de ocorrência da falha, tempos de vida entre falhas e quilómetros percorridos das automotoras aquando da falha. Uma vez modelados os dados desta forma, é efectuada uma análise estatística individual e colectiva das automotoras, considerando como histórico de ocorrências o período temporal entre 1 de Janeiro de 2010 e 30 de Abril de 2012.

Na referida análise estatística avalia-se a evolução da taxa de falhas ao longo do período temporal considerado, recorrendo-se ao teste de *Laplace*, assim como o cálculo dos valores do indicador de desempenho MTBF. Por outro lado, e agora num contexto de frota, procede-se à identificação de quais os sistemas críticos que mais falhas registam, por recurso à aplicação do Princípio de Pareto.

¹ A descrição deste indicador de desempenho encontra-se mais à frente, no subcapítulo 2.3.4.

Na segunda etapa procede-se à concepção de um cenário, assente em diversos pressupostos, com o intuito de determinar qual o incremento obtido no MTBF médio da frota, resultante do facto de se aplicar o que se julga ser a melhor solução para cada um dos sistemas críticos. No caso específico de um dos sistemas, sendo o mesmo modelado de acordo com a distribuição de *Weibull*, decidiu-se recorrer à ferramenta informática *Statistica* como forma de modelar os tempos de vida e conseqüentemente de propor a política de manutenção preventiva mais adequada, que garanta um determinado nível de fiabilidade dos sistemas. No caso dos restantes sistemas críticos, estes são modelados de acordo com a distribuição de probabilidade que melhor os caracteriza.

1.4. Estrutura da Dissertação

Os temas tratados na presente dissertação desenvolvem-se ao longo de seis capítulos, repartidos por três partes distintas mas ainda assim complementares, proporcionando desse modo ao leitor uma consulta isolada de conteúdos, articulada simultaneamente com uma linha de raciocínio no que respeita à apreensão dos diversos conceitos e metodologias empregues.

Designada por **Fundamentos Teóricos**, a **Parte I** engloba os Capítulos 1, 2 e 3. No **Capítulo 1 – Introdução**, é apresentada uma visão geral de toda a dissertação, desde o âmbito e objectivos que esta perspectiva até à própria estruturação, passando pela metodologia adoptada. O **Capítulo 2 – Manutenção Ferroviária**, é iniciado com a apresentação da empresa onde o presente estudo decorreu, descrevendo-se sucintamente a sua estrutura hierárquica assim como as respectivas áreas de *core business*. Neste capítulo é igualmente apresentada a revisão bibliográfica referente às temáticas de manutenção e fiabilidade, procedendo-se à descrição dos diversos conceitos envolventes. Sempre que possível, é efectuada uma “ponte de ligação” entre a informação apresentada e o sector ferroviário. No caso da primeira temática, é efectuado um pequeno resumo da sua evolução histórica, assim como uma descrição das diversas políticas de gestão existentes e respectivos indicadores de desempenho. É ainda apresentado e descrito o plano de manutenção preventiva adoptado na empresa onde o presente estudo teve lugar. Relativamente à segunda temática, são apresentadas diversas metodologias que possibilitam o seu aumento, assim como enunciados diversos aspectos que comprovam a sua importância para o sector ferroviário. O **Capítulo 3 – Estatística das Falhas**, encerra a primeira parte com a apresentação da revisão bibliográfica referente à forma como os dados, neste caso falhas, podem ser modeladas, tendo em conta factores como a censura de informação, indicadores quantitativos de fiabilidade e distribuições de probabilidade. Procede-se ainda a uma explicação do conceito de sistema reparável e das diversas fases que o mesmo atravessa ao longo do seu ciclo de vida. Com o intuito de detectar em que fase se encontra o sistema reparável, é apresentado e descrito o teste de *Laplace*, assim como o modelo de *Crow*, recorrendo-se a este último para a quantificação do MTBF em ambiente de “fiabilidade crescente”.

A **Parte II**, designada por **Desenvolvimentos Práticos**, engloba os Capítulos 4 e 5. No **Capítulo 4 – Análise Estatística Global da Frota**, é apresentada uma descrição técnica do sistema reparável em estudo, nomeadamente a frota de automotoras eléctricas da S2300. São igualmente descritas as características mais relevantes da informação em análise que serve de suporte à análise estatística global efectuada. Dito isto, esta análise envolve o estudo da evolução da taxa de falhas em cada automotora, assim como o respectivo cálculo de indicadores representativos das mesmas. Com o intuito de perspectivar matéria para o capítulo seguinte, são ainda identificados os sistemas críticos responsáveis pela ocorrência da maioria das falhas registadas. O **Capítulo 5 – Cenário Proposto: Estudo do novo MTBF Médio da Frota**, é o capítulo culminante de todos os anteriores visto que é neste que a solução prática de valor acrescentado é apresentada. Desse modo, apresenta-se neste capítulo os cálculos que permitem determinar o valor do novo MTBF médio da frota que permite aferir o incremento observado, resultante da adopção de alguns pressupostos. Apresenta-se igualmente o cálculo da disponibilidade operacional comprovada pela frota. De forma a possibilitar ao leitor um melhor conhecimento dos sistemas críticos em questão, estes são descritos previamente em termos técnicos.

O estudo é finalizado com a **Parte III**, designada por **Conclusões Gerais**, englobando o **Capítulo 6 – Conclusões**. Neste, são apresentadas as conclusões alcançadas resultantes da realização do estudo assim como apresentadas algumas propostas a desenvolver em trabalhos futuros.

Ainda que não estejam ao abrigo da estrutura principal, os **Apêndices** e **Anexos** contêm informação relevante no sentido em que permitem clarificar ou facultar elementos importantes de informação às diversas matérias abordadas ao longo de todo o estudo.

Capítulo 2

Manutenção Ferroviária

1. Introdução

2. A Empresa – EMEF

3. Manutenção

4. Fiabilidade

2.1. Introdução

Sendo a EMEF a empresa em foco de estudo, visto que a presente dissertação foi desenvolvida nesta, foi necessário um conhecimento profundo da organização, assim como da sua estrutura, áreas de actividade e plano de manutenção adoptado. Nesse sentido, o presente capítulo tem como objectivo apresentar uma breve descrição dos referidos aspectos, com base em informação recolhida no terreno, junto de diversos colaboradores.

Por sua vez, procede-se igualmente a uma revisão bibliográfica de diversas questões envolventes à manutenção e respectivas estratégias de implementação, assim como à fiabilidade e sua importância, efectuando-se sempre que possível um alinhamento de informação com o sector ferroviário.

2.2. A Empresa – EMEF

A EMEF – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário, S.A. é a empresa portuguesa de referência do sector da manutenção ferroviária. Sendo esta uma empresa da área da metalomecânica, encontra-se inserida no código de actividade económica de fabricação e reparação de material circulante para caminho-de-ferro.

Fundada em Dezembro de 1992 como sociedade anónima, detida na sua totalidade pela CP Comboios de Portugal, iniciou a sua laboração em Janeiro de 1993 como resultado da autonomização da antiga direcção industrial da CP.

Inicialmente, a EMEF foi constituída com os serviços centrais de Lisboa e os Grupos Oficiais do Porto (GOP), Entroncamento (GOE), Barreiro (GOB) e Figueira da Foz (GFF), dedicando-se estes grupos inteiramente à reparação de material circulante.

Em 1994, encontrando-se em expansão com o alargamento da sua área de actividade à manutenção de material circulante, alguns estabelecimentos passaram a integrar a EMEF, tal como representado no Quadro 2.1.

EMEF – Empresa de Manutenção de Equipamento Ferroviário				
Manutenção do Norte (MN)	Manutenção do Centro (MC)	Manutenção de Lisboa (ML)	Manutenção do Sul (MS)	Manutenção de Material e Mercadorias (MMM)
<ul style="list-style-type: none"> • Oficina de Contumil • Oficina do Boavista • Oficina de Mirandela • Oficina de Livração • Oficina da Régua • Oficina de Semada do Vouga 	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina do Entroncamento • Oficina de Coimbra • Oficina da Figueira da Foz 	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina de Campolide • Oficina de Oeiras • Oficina de Santa Apolónia 	<ul style="list-style-type: none"> • Oficina do Barreiro • Oficina de Vila Real de Santo António 	<ul style="list-style-type: none"> • Entroncamento

Quadro 2.1 – Estabelecimentos oficiais de manutenção integrantes da EMEF em 1994.

Em 1999, tornando-se uma das accionistas da FERTREM – Operações Ferroviárias Internacionais S.A, a EMEF inicia a internacionalização das suas actividades com o objectivo de disponibilizar assistência técnica, industrial e comercial a diversas entidades do sector ferroviário. Em 2009, é aprovada pela tutela a constituição da EMEF – Internacional S.A., que vocacionando-se para o mercado externo, apresenta como principal objectivo o fabrico de vagões.

Actualmente, com sede social no Entroncamento e os serviços centrais na Amadora, a EMEF emprega 1200 pessoas, repartidas entre mão-de-obra directa e indirecta.

Em termos de certificações, a EMEF apresenta, desde 2000, o seu Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) certificado segundo a norma NP EN ISO 9001. Actualmente mantém-se esta mesma norma em vigor, datada da renovação e actualização em 2008. O mesmo acontece com a EMEF – Internacional S.A. que em 2010 obteve o seu SGQ certificado pela Associação Portuguesa de Certificação (APCER) relativamente à norma NP EN ISO 9001:2008. No que respeita aos equipamentos e grandezas do laboratório de ensaios e metrologia, estes encontram-se acreditados pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC) desde 2005 pela norma NP EN ISO/IEC 17025. Mais recentemente, em 2012, a EMEF obteve o certificado de nível CL1 referente à norma EN 15085-2 referente à soldadura de veículos e componentes.

2.2.1. Estrutura Organizacional

A estrutura organizacional da EMEF é gerida pelo conselho de administração e apoiada por assessores de diversos gabinetes internos que interagem de forma conjunta e activa com as diversas direcções funcionais (serviços centrais), tal como representado na Figura 2.1.

Num nível hierárquico superior aos serviços centrais, encontram-se os departamentos de Inovação & Desenvolvimento, designado por Inovação e Engenharia Ferroviária (DIEF), Unidade de Novos Projectos (UNP) e Unidade de Manutenção de Alta Velocidade (UMAV). Os dois primeiros são responsáveis pela concepção e desenvolvimento de projectos de cariz inovador e de optimização de processos, enquanto o último é responsável pela implementação de operações de manutenção de alta velocidade e pelo desenvolvimento de competências que possibilitem a gestão operacional da série pendular. Ainda no mesmo nível de hierarquia encontram-se os Parques Oficiais (PO), resultantes de sucessivas reestruturações organizativas dos diversos estabelecimentos oficiais criados em 1994. Localizados em locais geográficos distintos, cada PO inclui um grupo oficial responsável pelas operações de manutenção pesada e reabilitação do material circulante, e abrange determinadas oficinas de manutenção, tal como representado na Tabela 2.1.

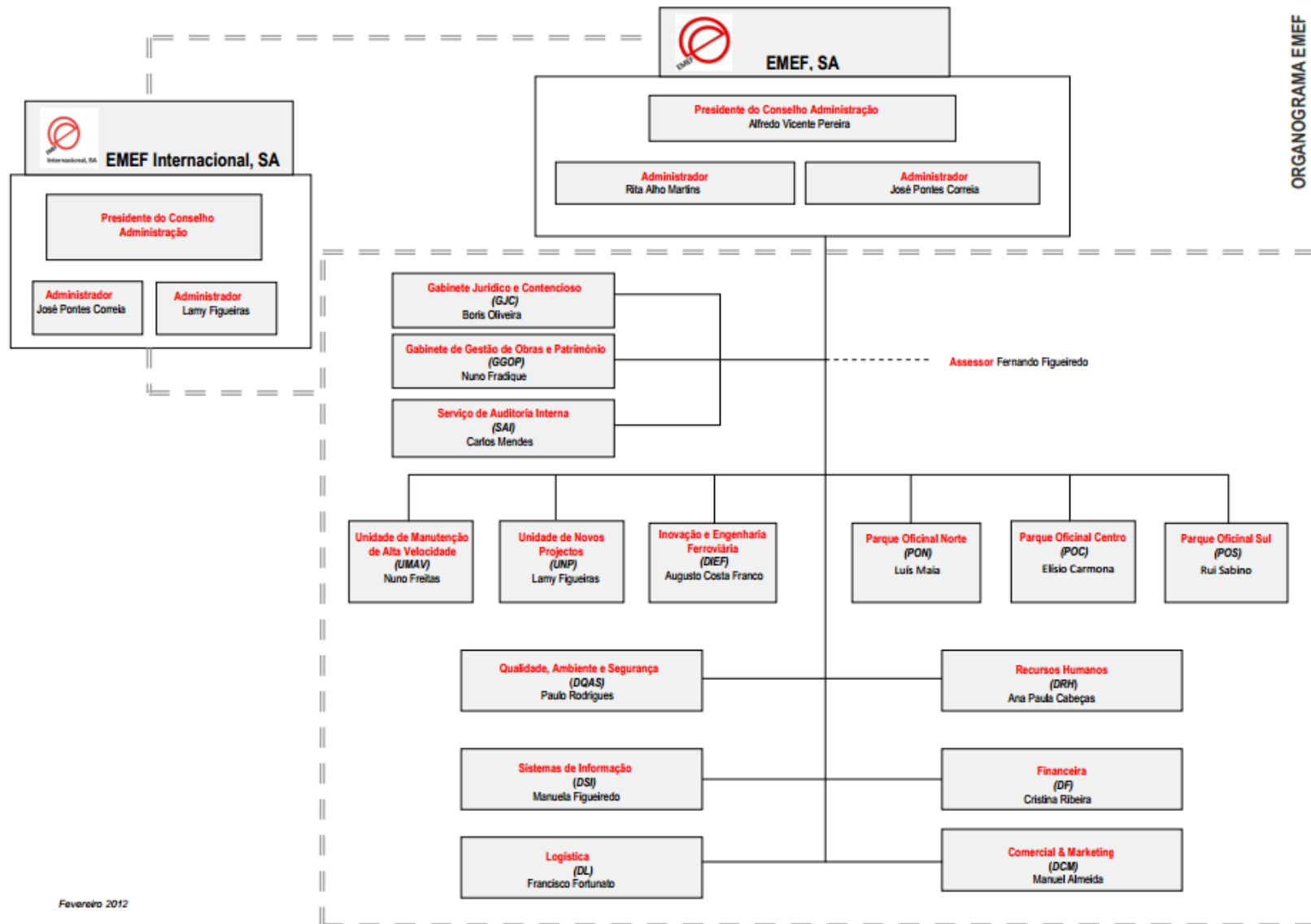
Tabela 2.1 – Oficinas de manutenção abrangidas pelos actuais PO e respectivas localizações.

PO	Localização	Oficina de Manutenção
Norte	Contumil	Mirandela Semada do Vouga
Centro	Entroncamento	-
Sul	Barreiro	Campolide Oeiras Poceirão Santa Apolónia Vila Real de Santo António

2.2.2. Áreas de Actividade

De forma a abranger a diversa frota de material circulante da CP, a EMEF exerce actualmente a sua actividade em cinco áreas distintas, tal como representado na Figura 2.2.

Como material circulante alvo da execução destas actividades, a CP detém em termos de material motor locomotivas e automotoras de séries distintas, dotadas de diferentes tipos de propulsão (eléctrica, diesel ou mista).



Fevereiro 2012

Figura 2.1 – Organograma representativo da estrutura organizacional da EMEF.



Figura 2.2 – Áreas de actividade da EMEF.

Os Comboios de Pendulação Activa (CPA) vulgarmente conhecidos como pendulares, fazem igualmente parte da sua frota. Em termos de material rebocado, contemplam-se as carruagens de natureza distinta (1ª e 2ª classe, bar, restaurante, cama), assim como os reboques e vagões, sendo estes últimos utilizados para o transporte de mercadorias.

Grande Reparação, Reabilitação e Recondicionamento

Nesta área de actividade procede-se à manutenção pesada do material circulante sempre que este não garanta os níveis exigidos de fiabilidade, segurança e conforto para os passageiros. Esta actividade é posta em prática sempre que o material circulante apresente um determinado tempo de funcionamento, mensurável em quilometragem ou em anos de potencial de vida.

Pelo facto de a manutenção pesada implicar a intervenção de trabalhos de teor preventivo, esta é realizada segundo um Plano de Manutenção Preventiva² (PMP) característico do material circulante em questão. Uma vez que o presente estudo incidirá nas automotoras da S2300, descritas no Capítulo 4, apresenta-se na Tabela 2.2 a descrição dos tipos de revisão de níveis distintos, aplicados à mesma.

No caso da Revisão de nível 2 (R2), verifica-se um relativo grau de profundidade, envolvendo o recondicionamento ou mesmo a substituição de bens, sejam eles equipamentos ou simples componentes, que se encontrem quase em fim de vida. Exemplos disso mesmo são os diversos bens pneumáticos pertencentes a equipamentos distintos, assim como as janelas que foram igualmente substituídas, com vista a melhorar as condições de visibilidade dos passageiros e reduzir encargos com a manutenção em caso de quebra do vidro.

² A descrição do PMP encontra-se mais à frente no subcapítulo 2.3.4 podendo este ser consultado de forma mais pormenorizada no Anexo A, disponível apenas em suporte digital (CD-ROM) por motivos de dimensões.

Tabela 2.2 – Tipos de revisão de manutenção pesada das automotoras S2300.

Tipo de Revisão	Periodicidade	Tempo Médio de Imobilização do Material Circulante	Operações Efectuadas
R2	1.600.000 Km ou 12 a 15 Anos	55 Dias úteis	Substituição de elementos pneumáticos (válvulas, electroválvulas, etc); Substituição das janelas; Renovação de interiores (bancos dotados de estofos novos); Introdução de sistema áudio de informação aos passageiros; Criação de zonas para pessoas com mobilidade reduzida e transporte de bicicletas; Alteração da decoração exterior (pintura das carruagens)
R1	25 a 30 Anos	60 a 90 Dias úteis	Remotorização da maioria dos equipamentos

Os trabalhos de reabilitação e modernização também são frequentes na R2, sendo as frotas de automotoras S2300 e S3500 os exemplos mais recentes a referir. Actualmente encontra-se a decorrer este tipo de trabalhos nas 54 automotoras (42+12, respectivamente) que efectuem serviço comercial de passageiros em algumas das linhas suburbanas de Lisboa. A título de exemplo, é possível através da Figura 2.3 visualizar, ainda que apenas exteriormente, o estado de uma automotora da S2300 antes e depois de uma modernização do tipo R2 que foi alvo dos objectos de trabalho apresentados na Tabela 2.2.



Figura 2.3 – Automotora S2300 antes (esquerda) e depois (direita) da R2.

Comparativamente à R2, a R1 diferencia-se pelo facto de implicar intervenções de maior grau de profundidade, nomeadamente a remotorização na íntegra da maioria dos equipamentos. Apesar disso, pretende-se em ambas as revisões garantir que o potencial de vida seja reposto aos equipamentos intervencionados.

Pela natureza dos trabalhos que as reparações descritas implicam, assim como pelos tempos de imobilização associados, as mesmas são efectuadas nos GO de forma a não sobrecarregar a carga de trabalho nas oficinas de manutenção. Por sua vez, a atribuição do material circulante aos GO é efectuada em função do nível de *know-how* que cada um destes possua relativamente ao material circulante em questão. Na Tabela 2.3 apresentam-se alguns exemplos de material circulante atribuído aos diversos locais.

Tabela 2.3 – Atribuição do material circulante a cada GO para efeitos de manutenção pesada.

Tipo de Estabelecimento Oficial	Localização	Material Circulante atribuído
Grupo Oficial (GO)	Contumil	CPA 4000 Automotoras Eléctricas Metro ligeiro ...
	Entroncamento	Locomotoras Diesel Eléctricas Automotoras Eléctricas S2300, S3500 Vagões ...
	Barreiro	Locomotoras Diesel Eléctricas Automotoras Diesel Hidráulicas ...

Manutenção

A manutenção é a principal área de actividade entre as diversas exercidas pela EMEF, isto porque a mesma é responsável por condicionar o sucesso da operacionalidade do material circulante. Significa isto que o correcto e normal funcionamento deste encontra-se dependente da adequada ou inadequada adopção dos procedimentos de manutenção que se realizem.

Inserida na vertente da manutenção planeada, a manutenção preventiva engloba a supervisão de todos os bens constituintes do material circulante, de forma a garantir tanto a segurança de circulação deste, quanto os padrões de qualidade exigidos pelo cliente. Pelo facto de existir uma enorme diversidade de material circulante, este tipo de manutenção, também denominado de manutenção de linha, é efectuada nas oficinas da área geográfica onde o mesmo presta serviço comercial, tal como representado na Tabela 2.4.

A atribuição do material circulante às diversas oficinas espalhadas por território nacional é efectuada de acordo com o nível de *know-how* que cada uma destas possua relativamente ao material circulante em questão.

Tabela 2.4 – Atribuição do material circulante a cada oficina de manutenção para efeitos de manutenção de linha.

Tipo de Estabelecimento Oficial	Localização	Material Circulante Atribuído
Oficina de Manutenção	Campolide	Automotoras Quádruplas Eléctricas S2300, S2400, S3500, ...
	Santa Apolónia	Carruagens, Automotoras Simples Diesel S300 e Duplas S400
	Oeiras	Automotoras Triplas Eléctricas S3150 e Quádruplas S3250
	Vila Real de Santo António	Automotoras Duplas Diesel S450
	Poçoirão	Vagões Tejo Energia S933

As operações de manutenção de linha referentes às automotoras S2300 encontram-se organizadas em 5 níveis distintos de intervenção, como apresentado na Tabela 2.5. De entre todas as visitas, a visita de nível 5 (V5) é a que engloba operações de trabalho mais simples efectuadas num menor número de equipamentos, razão pela qual é efectuada com maior frequência, de 10.000 em 10.000 Km. Consoante a diminuição do nível da visita, maior a profundidade da manutenção e leque de equipamentos verificados, sendo que todas as operações efectuadas numa V5, são igualmente efectuadas nas restantes visitas, e assim sucessivamente.

Tabela 2.5 – Tipos de visita de manutenção de linha das automotoras S2300.

Tipo de Visita	Periodicidade (Km)	Tempo Médio de Imobilização do Material Circulante	Operações Efectuadas ³
V5	10.000	3h	Supervisão visual do exterior do disjuntor principal; Registo das avarias na UCC e UCT; ...
V4	20.000	3h	Supervisão do nível do electrólito nas células das baterias; Substituição dos filtros dos motores de tracção; ...
V3	40.000	3h	Medição da altura das escovas do pantógrafo; Supervisão interna do disjuntor principal; ...
V2	200.000	5 Dias úteis	Limpeza, sopragem e lubrificação da UCC e UCT, conversor de tracção e motores de tracção, respectivamente; ...
V1	800.000	55 Dias úteis	Remotorização dos <i>bogies</i> ; ...

³ No Anexo A3 (disponível em suporte digital – CD-ROM) podem ser consultadas as restantes operações efectuadas em cada uma das 5 visitas. Note-se que as periodicidades e tempos de imobilização apresentados não correspondem aos actuais valores da Tabela 2.5, visto ter ocorrido a actualização das mesmas.

Note-se que a V1 apenas é realizada na oficina de manutenção de Campolide a primeira vez que o material circulante atinge esta quilometragem, visto que decorridos 1.600.000 Km, este está em condições de ser alvo de uma revisão de nível 2. De referir que qualquer uma das visitas descritas é diferenciada em visita de parque ou dique, consoante diga respeito às operações de manutenção que se efectuem em cada local. A título de exemplo, numa visita de parque para intervenção mecânica, testa-se o funcionamento dos areeiros em marcha à frente e atrás, enquanto numa visita de dique procede-se ao abastecimento de areia dos mesmos.

Entre o universo das visitas, apenas as do tipo V3, V4 e V5 são executadas em *Split*, isto é, a execução das operações em parque precede a execução das operações em dique. As intervenções do tipo V1 e V2 não seguem esta mesma ordem por questões de inviabilidade prática. Significa isto que por razões de complexidade que estas intervenções envolvem, o material circulante ocupa demasiado tempo na linha, perdendo-se disponibilidade para outras intervenções que poderiam estar a decorrer no mesmo local. Além disso, a quantidade excessiva de recursos humanos alocados a estes tipos de intervenção apresenta-se como outra desvantagem. Nas situações em que não se encontre agendada uma visita, mas o material circulante encontre-se em parque, por questões de rotação do material, procede-se à realização das Inspeções de Serviço (IS). Nestas, procede-se ao diagnóstico do funcionamento eléctrico e mecânico dos diversos equipamentos, através de testes e ensaios, existam ou não anomalias registadas.

Ainda neste contexto das actividades de intervenção, pode surgir em qualquer uma das visitas a ocorrência de trabalhos de manutenção não planeados, isto é, Trabalhos Não Sistemáticos (TNS). Este tipo de trabalhos decorre como resultado do aparecimento de avarias não registadas que condicionam a integridade funcional do material circulante.

Além da manutenção preventiva, efectuam-se ainda visitas de manutenção correctiva, aquando da ocorrência de condicionantes como Avarias (VAV), Acidentes (VAC) ou Vandalismo (VAN). A título de exemplo podem traduzir-se, respectivamente, em avarias de linha – em situações de socorro, embate em veículos rodoviários ou atropelamento de pessoas e animais, e vidros partidos ou bancos cortados.

Montagem, Ensaios e Comissionamento

Esta área de actividade está essencialmente relacionada com o serviço pós-interventivo em qualquer material circulante pertencente à CP. Significa isto que sempre que o material circulante é sujeito a uma intervenção de carácter preventivo ou correctivo, é prestado à *posteriori* um acompanhamento contínuo do mesmo durante um determinado período de tempo, de forma a garantir que os equipamentos que o integram foram projectados, instalados, testados e operados segundo as necessidades e requisitos efectivos do cliente.

Concepção, Fabrico e Reabilitação de Vagões

Nesta área de actividade procede-se ao desenvolvimento íntegro de todo o projecto de fabrico de vagões, desde a projecção em 3D dos modelos até ao fabrico em si do material circulante de acordo com especificações e requisitos pretendidos. A título de exemplo a EMEF teve como primeiro cliente a república federal da *Bósnia-Herzegovina*, que em 2005 procedeu à compra de uma frota de 356 vagões, nomeadamente 300 vagões do tipo EAS-Z (transporte de inertes), 28 do tipo TADNS (transporte de cereais) e 28 do tipo HABIS (transporte de contentores). Mais recentemente, em 2010, foram fabricados 400 vagões para o transporte de contentores a pedido da CP Carga. Procede-se ainda nesta área à reabilitação de vagões sendo exemplo disso a frota de 211 vagões encomendados em 2005 pela *Bósnia-Herzegovina*.

Inovação & Desenvolvimento

O DIEF encontra-se actualmente repartido por duas sedes, uma nas instalações da EMEF na Amadora e outra num pólo de desenvolvimento de *software* no Porto, em Guifões. Tal como o próprio nome indica, este departamento tem como missão o desenvolvimento de projectos de investigação, de carácter inovador, para o universo ferroviário nacional e internacional. Desta forma, o DIEF conta com a ajuda de parceiros de naturezas distintas, desde instituições de ensino superior a empresas nacionais e estrangeiras.

Em 2009 a empresa desenvolveu alguns projectos dos quais se destacam o diário técnico de bordo digital e a plataforma *InfoTec*, sendo o primeiro detentor de patente industrial. Com este diário técnico pretende-se facilitar ao maquinista o registo fidedigno de avarias, em tempo real, que decorram durante o serviço comercial prestado. Por sua vez, através da plataforma *InfoTec* pretende-se tornar possível a inserção e consulta de informação técnica, de modo uniformizado, referente ao material circulante. Na prática, apenas este encontra-se actualmente implementado uma vez que o diário técnico foi considerado financeiramente não viável.

Actualmente a EMEF encontra-se a desenvolver o projecto europeu *SafeRail*, em parceria com 11 empresas de 6 países diferentes. Com este projecto pretende-se minimizar falhas associadas a rodas e eixos, através da implementação de dois sistemas de inspecção não destrutiva de rodados, ainda em fase de projecto. Estes têm como princípio de funcionamento a análise de altas frequências e a inspecção electromagnética e ultra-sónica dos rodados.

2.3. Manutenção

De acordo com (CEN, 2010), o conceito de manutenção é descrito como sendo “a combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem,

destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que o mesmo possa desempenhar uma função requerida”.

Entenda-se que o termo *bem* aqui utilizado pode assumir a designação de *sistema*, *subsistema*, *componente* ou *equipamento* consoante a situação (CEN, 2010), razão pela qual este será sempre adoptado ao longo do trabalho como forma de uniformização da linguagem, exceptuando os devidos casos.

A título de exemplo, e segundo Assis (2004), um componente é uma peça simples, mecânica ou eléctrica/electrónica (vela de ignição, transistor, rolamento, etc) impossível de ser desagregada. Por sua vez, um subsistema e um sistema são um conjunto de diversos componentes que formam um dispositivo de complexidade variável (motor eléctrico, caixa de velocidades, etc). Um equipamento poderá ser entendido como um sistema bastante complexo como se trate de uma máquina-ferramenta ou máquina de produção.

Actualmente, tendo em conta os elevados níveis de automação das máquinas nos sectores industriais, pretende-se garantir que estas não apresentem falhas, de forma a não comprometer a produtividade e lucro da empresa (Mishra & Pathak, 2006). Nesse sentido tem-se verificado ao longo das últimas duas décadas um aumento do reconhecimento da manutenção enquanto parte essencial de um negócio, tendo os custos de investimento em manutenção e fiabilidade capturado a atenção dos gestores das empresas (Venkataraman, 2010). Deste modo, a adopção de políticas eficientes de manutenção fará toda a diferença em termos de vantagem competitiva (Alsyouf, 2007).

2.3.1. Evolução Histórica

Segundo Kobbacy & Murthy (2008), a história da manutenção remonta a finais do século XIX aquando da franca expansão da indústria automóvel, suportada pela filosofia de produção em série de *Henry Ford*, onde acções de carácter correctivo representavam o principal foco de actuação. Decorridas algumas décadas e ultrapassada a II Guerra Mundial, viria-se a comprovar nas décadas 50 e 60 alterações nas filosofias de manutenção, passando a valorizar-se gradualmente a manutenção preventiva nas mais diversas indústrias (incluindo a ferroviária) uma vez que a mesma permitia uma redução do número de falhas nos sistemas (Venkataraman, 2010).

No início da década de 70, surgia no Japão pelas “mãos” da TOYOTA o conceito de Manutenção Produtiva Total, do inglês *Total Productive Maintenance* (TPM). Revelando excelentes resultados, este modelo tornou-se rapidamente numa referência de sucesso para as empresas pela forma como era implementado. Deste modo, pretendia-se envolver activamente as pessoas da empresa desde o topo da hierarquia à base, na execução das operações, visando-se simultaneamente colocar em prática programas de manutenção preventiva que

cobrissem o ciclo de vida dos sistemas, possibilitando a maximização da sua disponibilidade através da meta dos zero defeitos (Pinto, 1999).

Segundo Kobbacy & Murthy (2008), na transição da década 80 para 90 viria-se a dar um novo passo na história com o aparecimento da manutenção proactiva, resultante da necessidade que a manutenção representa para a definição e requisitos de projectos, especificamente no desenvolvimento dos sistemas. Defendendo o princípio de que se deve actuar nas etapas iniciais de concepção dos sistemas, evitando assim futuras consequências negativas, este tipo de manutenção tem demonstrado ser bastante útil. Nesse sentido, Ito & Nagai (2008) abordam a importância que o tipo de materiais representa em termos de aumento do tempo de vida do sistema. Com base no estudo efectuado, o autor chega à conclusão que os polímeros, normalmente utilizados em sistemas de amortecimento, isolamento de vibrações e revestimentos, apresentam inúmeras vantagens quando comparados com os metais, nomeadamente em termos de peso (inferior), resistência (superior), oxidação (ausente) e facilidade de processamento.

A manutenção representa para as empresas actualmente e mais do que nunca elevados níveis de importância no que respeita a manter a segurança dos sistemas. Nesse sentido, Holmgren (2005) afirma que é necessário analisar devidamente os mesmos de forma a implementar as devidas e correctas operações, evitando consequentemente a ocorrência de grandes perdas, que no pior cenário se traduzirão em acidentes ferroviários. De acordo com Evans (2011), os registos históricos surgem nesta fase como uma ferramenta fundamental para a obtenção de ilações sobre a evolução das taxas de acidentes. Num estudo desenvolvido pelo autor, baseado num histórico de acidentes entre 1980 e 2009, é demonstrado isso mesmo.

2.3.2. Metodologia RCM

De forma a atingir uma manutenção eficaz é necessário recursos como tempo e dinheiro, recursos esses que na maioria das vezes se apresentam escassos nas empresas. Com efeito, surge a necessidade de analisar que sistemas justificam tal dispêndio, assim como qual o momento em que se deve intervir.

Neste âmbito, a Manutenção Centrada na Fiabilidade, do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM) apresenta-se como uma metodologia de solução. Tendo origem em 1978 na indústria aeronáutica comercial dos Estados Unidos da América, a RCM pode ser entendida como “um método sistemático para determinar quais devem ser os requisitos de manutenção de forma a assegurar que qualquer equipamento continue a desempenhar as funções requeridas no seu contexto operacional” (Assis, 2004).

Segundo Carretero *et al.* (2003), a RCM apresenta três grandes objectivos, nomeadamente:

- ✓ Aumentar a segurança e fiabilidade dos sistemas através da focalização nas funções mais importantes, isto é, exigindo ao sistema que exerça o que se pretende e não o que o mesmo faz actualmente;
- ✓ Prevenir ou atenuar as consequências das falhas em detrimento de prevenir simplesmente a ocorrência das falhas em si;
- ✓ Reduzir os custos de manutenção evitando ou removendo as operações que não acrescentam valor.

A metodologia RCM nem sempre proporciona a manutenção eficaz e eficiente desejada por dificuldades de natureza variável, como se trate por exemplo da dimensão do sistema. Nesse sentido, Carretero *et al.* (2003), revelam num estudo algumas razões que dificultam esta questão quando estão em causa sistemas de larga escala como seja um conjunto de várias redes ferroviárias (das quais faz parte a RENFE). Macchi *et al.* (2012) apresentam um estudo semelhante, aplicado às infra-estruturas ferroviárias italianas, onde se pretende avaliar de que forma é que a função de transporte (referente ao estado do sistema ferroviário – em normal funcionamento, funcionamento anómalo ou inactivo) pode ser garantida através da infra-estruturas, aquando da identificação dos bens mais críticos presentes nestas.

2.3.3. Estratégias e Tipos de Manutenção

Com o intuito de alcançar competitividade nos negócios, Pinto (1999) afirma que a manutenção deve ser conduzida por uma estratégia definida pela empresa. Nesse sentido, de acordo com CEN (2010), a gestão da manutenção pode ser entendida como “todas as actividades de gestão que determinam os objectivos da manutenção, estratégias, responsabilidades e implementação das mesmas, através de diversos meios como o planeamento, controlo e melhoria das actividades económicas e de manutenção”. Com esta gestão pretende-se garantir que um sistema apresente a disponibilidade e condições de funcionamento requeridas ao menor custo, assim como a segurança e outros requerimentos associados ao sistema. Pretende-se igualmente considerar todos os impactos no meio ambiente e manter a durabilidade e qualidade do bem ou serviço fornecido, considerando sempre que necessário os custos. Com efeito, todos estes objectivos constituem o que Alsyouf (2006) apelida de função manutenção.

Quantificando o desempenho desta função através de uma das diversas ferramentas encontradas na literatura, é possível avaliar uma estratégia de manutenção adoptada numa organização. Desse modo, Pintelon *et al.* (2006) apresentam a metodologia de Hayes e Wheelwright's como uma ferramenta de medição robusta e genérica, resultante da sua aplicabilidade a qualquer estratégia de manutenção. Por sua vez, Alsyouf (2006) apresenta um modelo baseado na metodologia *Balanced Scorecard* onde através da análise entre as relações das variáveis clientes, finanças, processos de negócio internos e inovação e

crescimento, se comprovou o impacto que estas têm em termos operacionais. Por outro lado, Al-Najjar (2007) afirma com base num estudo efectuado na Suécia que através da metodologia baseada na vibração dos componentes, *Vibration-Based Maintenance* (VBM), é possível identificar alterações no estado e qualidade dos componentes, incorrendo-se num investimento que possibilitará um retorno 5 a 10 vezes superior a este.

No caso prático das infra-estruturas ferroviárias, Åhrén & Parida (2009a) apresentam o *benchmarking* como uma ferramenta eficiente em contexto de melhoria contínua capaz de quantificar, através de indicadores de desempenho, o grau de eficiência de execução de uma determinada função.

De acordo com Pinto (1999), as políticas de manutenção dentro de uma empresa são influenciadas por factores internos e externos, que a título de exemplo podem passar, respectivamente, pelo tipo, idade e condições de funcionamento das instalações assim como pela concorrência de mercado de prestação de serviços de manutenção. Nesse sentido, é fundamental que as empresas explicitem claramente quais as políticas a implementar, pelo que de acordo com Assis (2004), estas apresentam a seguinte classificação:

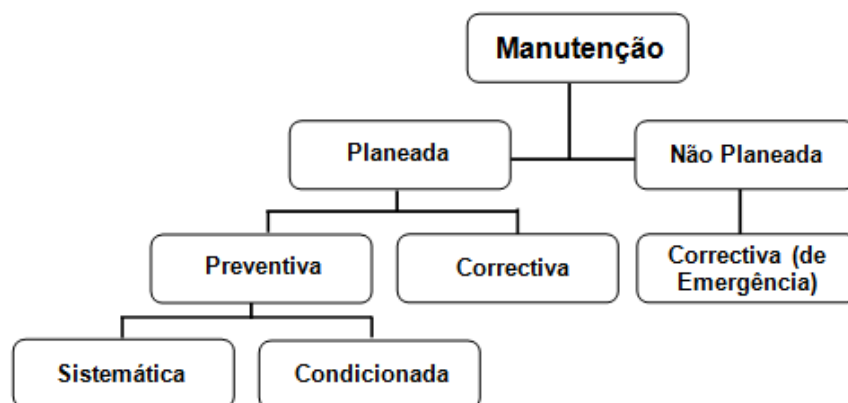


Figura 2.4 – Classificação das diversas políticas de manutenção. (Adaptado de: Assis (2004))

Manutenção Planeada

Tal como representado na Figura 2.4, este tipo de manutenção inclui a manutenção preventiva e correctiva. Segundo CEN (2010), a **manutenção preventiva** é “efectuada em intervalos pré-determinados ou de acordo com critérios estabelecidos e destina-se a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um bem”.

De acordo com Pinto (1999) e Venkataraman (2010), a aplicação de manutenção preventiva em detrimento de outras possibilita inúmeras vantagens, nomeadamente:

- ✓ Aumento da disponibilidade dos sistemas;

- ✓ Redução do risco de acidentes graves devido a avarias, com o conseqüente aumento da segurança dos sistemas e pessoal;
- ✓ Maior automação nas indústrias;
- ✓ Redução dos níveis de *stocks* de segurança;
- ✓ Redução das redundâncias dos sistemas;
- ✓ Redução do consumo de energia nas operações de manutenção.

Por sua vez, a **manutenção correctiva** é “efectuada após o reconhecimento da falha, com o objectivo de colocar o bem num estado em que o mesmo possa executar a função requerida” (CEN, 2010).

Ao abrigo da manutenção preventiva encontra-se a **manutenção sistemática** e condicionada. No caso da primeira, também designada pelo Comité Europeu de Normalização por manutenção predeterminada, desencadeia-se de forma periódica com intervalos de tempo definidos ou após um sistema atingir um determinado limite de idade. Esta periodicidade assenta em conhecimentos das leis de degradação aplicáveis a cada caso e do risco de falha assumido (Assis, 2004).

No caso da **manutenção condicionada**, aplicada aquando do fim da vida útil dos bens, procede-se à medição de diversos parâmetros através de técnicas de controlo de condição (análise de vibrações, temperaturas, contaminantes nos óleos, etc), com o intuito de identificar o nível de degradação dos bens (Assis, 2004). De acordo com um estudo desenvolvido por Golmakani & Fattahipour (2011), esta é uma questão relevante para a análise do impacto provocado na função custo de uma empresa, caso esta adopte um programa de inspecção inadequado.

Segundo Venkataraman (2010), o estudo dos níveis de degradação constitui por si só um outro tipo de manutenção, dentro da condicionada, conhecida como **manutenção preditiva**. Segundo CEN (2010), a mesma é definida como uma manutenção que é “efectuada de acordo com uma previsão obtida através de análise repetitivas ou de características conhecidas decorrentes da avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem”.

Manutenção Não Planeada

Este tipo de manutenção traduz-se numa manutenção do tipo correctiva pois verifica-se aquando da ocorrência de uma anomalia de forma catastrófica, ou seja, aquando da ausência de um indício prévio da sua ocorrência. Desta forma, esta manutenção implica a intervenção em modo de emergência. De acordo com Marques (2009), esta manutenção revela-se bastante dispendiosa para a empresa visto que em função do aumento de intervenções não programadas, o *stock* de peças em reserva terá de ser superior, aliado ao facto de que as operações de urgência tendem normalmente a registar elevados custos.

2.3.4. Indicadores de Desempenho da Gestão da Manutenção

Antes de iniciar uma análise a um sistema, é importante compreender desde logo a diferença entre dois conceitos subjacentes a esta, nomeadamente a diferença entre *Falha* e *Avaria*. Nesse sentido, e de acordo com CEN (2010), uma *Avaria* pode ser entendida como um evento onde um bem deixa de realizar a função requerida, ao contrário da *Falha* que representa um estado do próprio bem, resultante de ter ocorrido a falha.

De acordo com Cabral (1998), com o intuito de alcançar o sucesso em termos de implementação das políticas de manutenção, é frequente recorrer-se a indicadores de desempenho como ferramenta de análise e compreensão da cadência das falhas, assim como dos tempos de reparação e respectiva disponibilidade dos equipamentos.

De entre os diversos indicadores de desempenho encontrados na literatura, o MTBF, MTTF, MTTR e Disponibilidade do equipamento são os mais conhecidos, razão pela qual são descritos de seguida.

Tal como o nome indica, o Tempo Médio Entre Falhas, do inglês *Mean Time Between Failures* (MTBF) – $\hat{\theta}$, consiste no tempo que decorre entre duas falhas consecutivas, sendo este definido pelo rácio entre o período total de duração do ensaio – T (quantificado em Horas, Km, ciclos, etc), e o número de falhas (n_f) ocorridas durante esse mesmo período.

$$MTBF = \hat{\theta} = \frac{T}{n_f} \quad (2.1)$$

De forma a quantificar o MTBF mínimo (θ_i), ou seja, o tempo médio mínimo entre falhas para o qual a taxa de falhas é máxima, recorre-se para um determinado nível de significância α à seguinte expressão:

$$\theta_i = \frac{2 \times T}{\chi_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}^2} \quad (2.2)$$

Por sua vez, o Tempo Médio Para Falhar, do inglês *Mean Time To Fail* (MTTF), fornece um resultado igual ao MTBF nos casos em que o sistema apresenta uma taxa de falhas constante. Desta forma, este indicador é definido como o inverso da taxa de falhas (λ), parâmetro este representativo da distribuição Exponencial negativa.

$$MTTF = \hat{\theta} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

O Tempo Médio de Reparação, do inglês *Mean Time To Repair* (MTTR) apresenta-se como um outro indicador que engloba diversos tempos, nomeadamente de diagnóstico da falha, de alocação dos recursos necessários, da reparação em si e dos testes e entrega do

equipamento. Deste modo, o MTTR é definido pelo rácio entre o tempo de reparação (TTR) e o número de falhas, como representado na seguinte expressão:

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{n_f} \quad (2.4)$$

Uma vez que não existem sistemas perfeitos, é de esperar que os mesmos se encontrem indisponíveis durante um período de tempo da sua vida útil em resultado da ocorrência de falhas. Desta forma, o indicador Disponibilidade (D) encontra-se fortemente dependente de variáveis como a fiabilidade ou a manutibilidade, onde se pretende que estas proporcionem, respectivamente, uma maior duração possível do equipamento sem falhas e uma reparação mais rápida aquando da falha (Assis, 2004). Assim, este indicador é definido pela seguinte expressão:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.5)$$

2.3.5. Plano de Manutenção Preventiva da EMEF

À semelhança do que se verifica nas mais diversas indústrias detentoras de *know-how* específico, a EMEF dispõe do seu próprio Plano de Manutenção Preventiva (PMP) para cada tipo de material circulante da sua responsabilidade. Tal como dito anteriormente, será apresentado no presente subcapítulo o PMP aplicado às automotoras S2300.

O PMP apresenta a designação de Sistema da Qualidade (SQ), sendo este constituído por três etapas sequenciais e hierarquizadas, tal como representado na Figura 2.5.

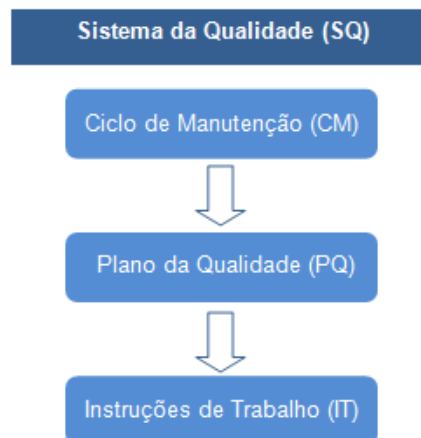


Figura 2.5 – Constituição do PMP adoptado nas automotoras S2300.

Ciclo de Manutenção (CM)

O CM tem como objectivo fornecer a indicação de quando é que a manutenção deve ser efectuada, sendo para isso necessário conhecer-se alguns itens, nomeadamente:

- ✓ Tipos de operações de manutenção preventiva;
- ✓ Periodicidade de cada intervenção;
- ✓ Tempo de imobilização de cada tipo de intervenção;
- ✓ Planos da qualidade de cada intervenção;
- ✓ Potenciais de vida dos equipamentos.

Desta forma, é possível dar a conhecer à equipa laboral e de gestão o actual ponto do CM em que o material circulante se encontra, garantindo-se desta forma uma supervisão controlada do material circulante. Esta supervisão é efectuada recorrendo aos gráficos e tabela de intervenções de cada visita. Nestes documentos, encontram-se respectivamente as periodicidades das intervenções em termos de quilometragem e a descrição das mesmas, com os respectivos documentos de referência necessários, periodicidades e tempos de imobilização.

O potencial de vida dos equipamentos é uma outra informação presente no CM, de igual nível de importância para a supervisão, uma vez que fornece indicações dos tempos expectáveis de vida de várias categorias de equipamentos. Associado a cada equipamento encontra-se um critério de substituição que poderá traduzir-se pelos quilómetros percorridos ou pelo tempo de serviço que o material circulante apresenta.

Plano da Qualidade (PQ)

O PQ destina-se a indicar os trabalhos a executar nas operações de manutenção preventiva às automotoras de acordo com as especificações do CM. Além disso, é nesta etapa do SQ que são definidos os tipos de intervenção a efectuar, V1 – V2 – V3 – V4 – V5 – IS, indicando para cada tipo o conjunto de equipamentos que serão alvo de visita. O PQ inclui ainda os diagramas dos processos destas visitas, onde através de fluxogramas se esquematizam os diferentes processos que decorrem durante a visita, estes acompanhados dos respectivos documentos de registo das diversas avarias.

De forma a atingir elevados padrões de qualidade na manutenção prestada aos equipamentos, é imperativo que determinadas operações sejam realizadas durante a manutenção preventiva sistemática dos mesmos, nomeadamente:

- ✓ Controlo visual;
- ✓ Controlo e regulação do correcto funcionamento;
- ✓ Limpeza, lubrificação e supervisão dos níveis de óleo;

- ✓ Troca sistemática de determinados equipamentos ou parte destes;
- ✓ Realização de testes necessários e inerentes da manutenção dos equipamentos sujeitos a intervenção.

Em termos de periodicidades e de operações a efectuar, é importante mencionar que tal informação é fruto da grande experiência acumulada no que respeita à manutenção de equipamentos similares, assim como do conhecimento efectivo do tipo de exploração a que o material circulante é sujeito. Aliada à execução dos referidos trabalhos de carácter preventivo encontra-se a componente da segurança operacional. Sendo esta integrante do PQ, apresenta um conjunto de disposições que todos os colaboradores⁴ devem seguir à risca antes de iniciarem operações de manutenção que envolvam trabalhos sobre o tejadilho ou cofres de alta tensão da unidade. Tais disposições traduzem-se em:

- ✓ Comprovar que a automotora está fora de catenária ou com catenária seccionada e sem possibilidade de ligação à mesma;
- ✓ Colocar a automotora fora de serviço por intermédio da caixa de interruptores de chaves do seccionador de terra;
- ✓ Verificar que o pantógrafo está devidamente baixado e em repouso no seu suporte de apoio antes de subir ao tejadilho;
- ✓ Ligar a automotora com alta tensão ou à bateria da mesma, após dada a autorização do técnico oficial responsável pela visita;
- ✓ Não permanecer nas imediações da antena do convel quando a bateria estiver ligada e o inversor numa das posições de marcha devido ao perigo de emissão de rádio frequência.

Instruções de Trabalho (IT)

Sendo as IT a última etapa do SQ, apresentam-se igualmente com um elevado grau de importância, visto que a eficácia da manutenção encontra-se dependente da correcta aplicação destas. Significa isto que as IT têm como objectivo fornecer aos colaboradores uma explicação clara e sucinta dos diversos trabalhos e operações a desempenhar nos diversos tipos de visita.

Por questões de organização e formação técnica, as IT encontram-se divididas em duas secções distintas, nomeadamente na secção Mecânica (M) e Eléctrica (E), ainda que estas componentes se complementam na prática em termos funcionais. Além desta divisão, cada uma destas secções subdivide-se em diversos Postos de Trabalho (PT), tal como representado na Figura 2.5. Associado a cada tipo de visita existe um ou mais PT que implicam a atribuição

⁴ Para efeitos de uniformização e percepção da linguagem utilizada, entende-se por colaborador qualquer indivíduo dotado de formação técnica (engenheiro, mecânico, electricista, etc.) que se encontre dentro das instalações da EMEF a desempenhar uma qualquer função de carácter laboral de duração de tempo variável.

de um determinado número de colaboradores (eléctricos e/ou mecânicos) para que estes desempenhem as operações de manutenção aos equipamentos que esse PT contempla.

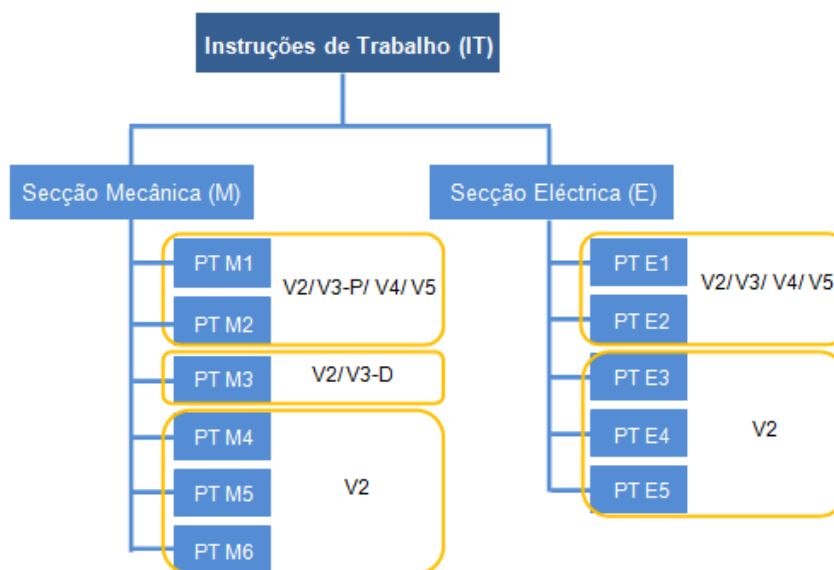


Figura 2.6 – Divisão das IT em secções e respectiva subdivisão destas em PT.

2.4. Fiabilidade

De acordo com Assis (2004), a Fiabilidade, do inglês *Reliability (R)*, é definida na área da engenharia como sendo a probabilidade da capacidade de um bem operar sem falha, ou seja, corresponde à probabilidade do mesmo cumprir uma função requerida durante uma missão (determinado intervalo de tempo) sob condições especificadas. A fiabilidade resulta da concepção e qualidade de fabricação do bem (características intrínsecas), assim como das condições de carga e ambientais em que decorrerá a sua operação (características extrínsecas). Segundo CEN (2010), a fiabilidade é dada normalmente em intervalos de tempo, sendo possível em alguns casos que a mesma seja dada em unidades de utilização como o número de ciclos, número de horas de utilização, número de quilómetros, entre outros.

À semelhança da manutenção, o estudo da fiabilidade representa para as empresas uma forte preocupação no que respeita à avaliação do risco dos sistemas, daí que nas últimas décadas se tenha vindo a verificar uma forte aposta no desenvolvimento de métodos de análise referentes à Engenharia da fiabilidade. Apresentando um papel bastante importante, esta engenharia encontra-se presente nos mais variados sectores industriais como se trate da indústria ferroviária, aeronáutica, militar e tecnologia aeroespacial e nuclear, entre outros (Sciutto, 2010). Uma vez que estes sectores exigem elevados níveis de fiabilidade nos seus bens (a título de exemplo motores de avião no caso da indústria aeronáutica e equipamentos fornecedores de potência na indústria ferroviária), recorre-se normalmente à condição de redundância como forma de aumentar eficazmente a fiabilidade dos mesmos (Walker, 2011).

Isto porque segundo O'Connor & Kleyner (2012), a fiabilidade obtida em sistemas básicos, que apresentam os seus componentes em série, surge da combinação da probabilidade de nenhum dos componentes experimentar a falha.

Sistemas em Série

Considerando um sistema composto por dois componentes, como representado na Figura 2.6, com funções de risco constante e dotados respectivamente de uma taxa de falhas λ_1 e λ_2 , o mesmo apresentará uma função de risco igual ao somatório da contribuição de cada componente, ou seja, $\lambda_1 + \lambda_2$.



Figura 2.7 – Sistema com componentes em série. (Fonte: O'Connor & Kleyner, 2012)

Sendo ambas as funções de risco constante, a fiabilidade de cada componente durante um período t de utilização será $R_1 = \exp^{-\lambda_1 t}$ e $R_2 = \exp^{-\lambda_2 t}$, de onde resulta uma fiabilidade do sistema de $R_1 \times R_2 = \exp^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$. Para um sistema com n componentes em série, a fiabilidade será:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \tag{2.6}$$

Caso os componentes apresentem uma taxa de falhas constante, a fiabilidade do sistema será:

$$R = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \times t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \times t} \tag{2.7}$$

Tendo especial relevo nos casos em que os sistemas experimentam falhas de natureza estocástica, Chen & Nakagawa (2013) apresentam dois tipos de redundância, nomeadamente a paralela e a sequencial (*standby*). Dentro da redundância paralela O'Connor & Kleyner (2012) apresentam duas tipologias distintas, nomeadamente a redundância total e a parcial.

Redundância Total

De entre os dois tipos de redundância paralela, esta é a mais simples visto que o sistema constituído por dois componentes, representado na Figura 2.8, funcionará independentemente da existência de avaria num qualquer dos seus componentes.

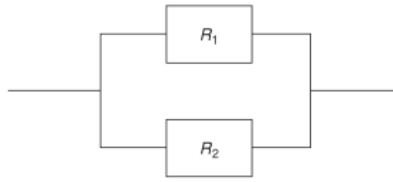


Figura 2.8 – Sistema com componentes em paralelo. (Fonte: O'Connor & Kleyner, 2012)

Tendo em conta a fiabilidade R_1 e R_2 de cada componente, o sistema apresentará uma fiabilidade R_p igual à probabilidade de pelo menos um deles não falhar, ou seja:

$$R_p = R_1 + R_2 - (R_1 \times R_2) \quad (2.8)$$

Caso os componentes apresentem uma função de risco constante λ_1 e λ_2 , a fiabilidade do sistema será:

$$R_p = e^{(-\lambda_1 \times t)} + e^{(-\lambda_2 \times t)} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \times t} \quad (2.9)$$

De forma genérica, para um sistema com n componentes em paralelo, a fiabilidade será:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.10)$$

Redundância Parcial

Ao contrário da redundância total em que todos os componentes estão activos, sendo apenas necessário um deles para garantir o funcionamento do sistema, a redundância parcial $R_{m(n)}$ limita um número mínimo de componentes para que o sistema funcione. Neste caso, a fiabilidade do sistema é calculada a partir da distribuição Binomial, que apresenta a seguinte função de distribuição de probabilidade (f.d.p.):

$$F(x) = \frac{n!}{x! \times (n-x)!} \times p^x \times q^{(n-x)} \quad (2.11)$$

Na f.d.p. anterior, x representa os bens em funcionamento, correspondendo $n-x$ ao número de bens avariados para uma amostra de n bens com uma probabilidade p de sucesso e q de insucesso. Deste modo, obtém-se a seguinte expressão da fiabilidade para um número mínimo de bens em funcionamento m :

$$R_{m(n)} = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} \frac{n!}{i! \times (n-i)!} \times R^i \times (1-R)^{n-i} \quad (2.12)$$

Redundância Sequencial (Standby)

Este tipo de redundância verifica-se em sistemas com componentes que funcionem em comutação, ou seja, aquando da avaria num de dois componentes, o que não se encontra avariado (que não está em funcionamento contínuo) entra de imediato em funcionamento, accionado por um disjuntor com uma fiabilidade R_{ds} . Os geradores eléctricos são um claro exemplo deste tipo de redundância pois sendo componentes idênticos ao principal, funcionam como reserva, como representado na Figura 2.9.

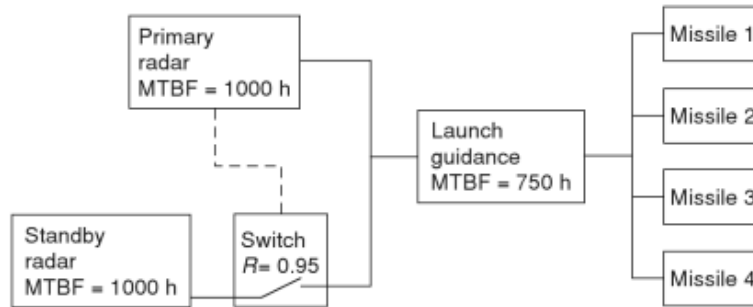


Figura 2.9 – Sistema de comutação de componentes (O’Connor & Kleyner, 2012).

De forma genérica, para um sistema com n componentes idênticos em reserva, com uma taxa de falhas λ , a fiabilidade R_{sb} será:

$$R_{sb} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda \times t)^i}{i!} \times e^{(-\lambda t)} \tag{2.13}$$

Caso o sistema seja apenas constituído por um componente em reserva, a expressão anterior assume a seguinte forma:

$$R_{sb} = e^{-\lambda t} + R_{ds} \times (\lambda \times t \times e^{-\lambda t}) \tag{2.14}$$

Onde a primeira e segunda parcela representam, respectivamente, a probabilidade de ocorrerem zero avarias ou uma avaria.

De acordo com Yang (2007), com recurso à engenharia da fiabilidade surgem grandes vantagens para as empresas. Estas passam pela maximização da fiabilidade dos sistemas, com a consequente minimização dos efeitos de falha assim como pela redução de custos totais em que as empresas incorrem, considerando que estas apresentam cenários de manutenção preventiva, em detrimento de manutenção correctiva.

2.4.1. A Importância da Fiabilidade neste Sector

À semelhança do que se verifica nos diversos sectores de transportes, quanto maior o índice de fiabilidade dos sistemas, maior as vantagens que daí advêm. Nestes casos, e de acordo com Abate *et al.* (2013), a fiabilidade representa para o sector ferroviário uma mais valia pois permite aferir uma maior confiança aos sistemas, com o bônus acrescido de não prejudicar a produtividade das operações, mantendo a pontualidade dos serviços.

Segundo Jensen (1998), do ponto de vista das empresas esta questão representa uma vantagem competitiva, que se traduzirá para o utilizador numa percepção de maior segurança e conforto assim como rapidez e regularidade do serviço prestado. Podendo estas características ser influenciadas negativamente pela fiabilidade, directa ou indirectamente, tem todo o interesse proceder à sua maximização. Nesse sentido, Corriere & Di Vincenzo (2012) procederam ao estudo do índice de qualidade ferroviária através das cadeias de *Markov* de forma a encontrar e decidir a melhor solução que respondesse aos problemas oriundos das variáveis de segurança, qualidade e eficiência, com o intuito de alcançar o melhor índice possível representativo do que os autores designam por conforto global.

Envolventes a este, diversos têm sido os estudos efectuados em vários campos, tendo-se Carrarini (2007) focado no estudo da estabilidade dos comboios quando sujeitos a ventos laterais. Tendo sido testado nos comboios de alta velocidade alemães de acordo com as mais recentes normas europeias referentes à estabilidade, procedeu-se à modelação dos parâmetros que detêm maior influência, ou seja, as variáveis estocásticas, tendo-se concluído que é possível controlá-las através de técnicas de fiabilidade. Desta forma, este campo tem ganho nos últimos anos especial atenção de pesquisas industriais.

Uma vez que está aqui em causa o transporte de pessoas e mercadorias, o ponto de vista descrito anteriormente representa para as empresas do sector ferroviário mais do que uma simples escolha de estratégia, passando-se a um nível de obrigatoriedade do respeito de determinados níveis mínimos de fiabilidade exigidos (Ben-Daya *et al.*, 2009).

No caso do transporte de mercadorias por via-férrea, (Dullaert & Zamparini, 2013) afirmam que os factores tempo e fiabilidade são dois dos mais importantes a nível económico pois possibilitam como vantagens o trânsito rápido e fiável de mercadorias com características distintas (ainda que não se considerem características heterogéneas como horas de ponta do tráfego), a um custo inferior comparativamente a outro meio de transporte. Vromans *et al.* (2006) acrescentam que reduzindo a propagação de atrasos provocada pela interdependência entre veículos ferroviários é possível aumentar a fiabilidade, podendo esta ser medida através da pontualidade do veículo à chegada ou saída de uma estação (Schaafsma, (2001) citado por Vromans *et al.* (2006)).

De acordo com Goverde & Meng (2011), a gestão das infra-estruturas ferroviárias apresenta igualmente uma elevada importância na medida em que simples atrasos de veículos provocam

de imediato a diminuição da capacidade da própria infra-estrutura, assim como uma diminuição da pontualidade, fiabilidade e segurança. Desta forma, os autores apresentam um *software* analítico utilizado numa via-férrea bastante movimentada na Holanda que proporciona uma ajuda fundamental à monitorização *online* das diversas operações envolventes à infra-estrutura. Este permite a detecção e actuação automática de forma rápida e eficiente perante possíveis rotas de conflito que possam vir a originar atrasos ou estrangulamentos na circulação, possibilitando aos analistas que exerçam simultaneamente outras tarefas.

Num outro estudo, Åhrén & Parida (2009b) apresentam uma possível abordagem para analisar os factores que mais influenciam o desempenho das infra-estruturas, tendo sido o referido estudo aplicado a uma rede ferroviária sueca e obtidas as respectivas conclusões em função do indicador de eficácia global de infra-estruturas ferroviárias. Com o intuito de aumentar o índice de pontualidade, Veiseth *et al.* (2011) sugere a implementação de um sistema de melhoria, desenvolvido junto da indústria ferroviária Norueguesa, com base em dados históricos e conhecimentos no terreno que permite gerar medidas de melhoria a serem postas em prática.

Capítulo 3

Estatística das Falhas

1. Introdução
2. Análise de Sobrevivência
3. Análise Estatística das Falhas
4. Sistemas Reparáveis

3.1. Introdução

Nas situações em que se pretende efectuar uma análise estatística das falhas de um sistema, a existência de poucos dados disponíveis pode representar uma barreira à obtenção de resultados concretos e fiáveis, especialmente nos estudos de sobrevivência (Assis, 2004). Nesse sentido, Glade *et al.* (2001) afirmam que o acesso a registos históricos é bastante útil na medida em que estes proporcionam uma larga visão da ocorrência temporal e espacial dos eventos.

Apesar da utilidade que os registos históricos demonstram, a presença de informação censurada necessita de uma especial atenção aquando da modelação dos dados para estudos de sobrevivência, razão pela qual este assunto é abordado no presente capítulo. A forma como a fiabilidade é definida representa um outro tópico de abordagem, apresentando-se igualmente uma estatística não paramétrica que permite um cálculo da sua estimativa.

Por sua vez, é descrita a distribuição estatística de *Weibull*, onde se apresentam vantagens da sua utilização face a outras distribuições de probabilidade. Com o intuito de identificar o padrão de falhas de um sistema, a descrição do teste de *Laplace* finaliza o presente capítulo. Todos os assuntos aqui enunciados serão abordados, portanto, em contexto de revisão bibliográfica.

3.2. Análise de Sobrevivência

De acordo com Allison (2010), a análise de sobrevivência é uma categoria de métodos estatísticos destinada ao estudo das ocorrências e respectivos tempos dos eventos. O conceito de evento pode ser entendido como uma alteração qualitativa situada no tempo, isto é, uma transição de um estado discreto para outro (ocorrência de falha num equipamento, por exemplo). Apresentando uma grande potencialidade de aplicação, este método demonstra ter utilidade nas mais diversas áreas, como se trate a título de exemplo da Engenharia e das

Ciências Naturais e Sociais. Deste modo, a sua denotação varia sendo que no caso específico da Engenharia assume a designação de análise de fiabilidade.

Tendo em conta que os dados dos tempos de falha contêm duas características intrínsecas difíceis de manipular com os métodos convencionais, nomeadamente os dados censurados e as covariáveis dependentes do tempo, pretende-se com a análise de fiabilidade calcular estimadores consistentes dos parâmetros. Para isso é necessário dividir a informação em dados censurados e não censurados, de forma a tornar possível a aplicação do método da máxima verosimilhança, por exemplo, que possibilita a obtenção dos referidos estimadores.

Informação Censurada

De acordo com (Klein & Moeschberger, 2003), sendo a informação censurada uma característica presente na maioria dos dados de tempo até à última falha, a censura surge quando o tempo exacto em que a falha ocorre não é conhecido. Existindo diversas classificações de censura na literatura, Allison (2010) considera que a distinção mais básica é entre a censura à esquerda e a censura à direita.

De acordo com Ryan (2007), um dado é considerado **censurado à direita** quando um bem é removido do estudo enquanto ainda se encontra em funcionamento, permanecendo desconhecido o instante de tempo em que voltará a falhar. Segundo o autor, sempre que este tipo de censura denominada **Tipo I**, seja utilizada, deve assumir-se que os bens retirados do estudo são tão representativos quanto os restantes. Na prática industrial, este tipo de censura é o mais comum visto ser difícil, em termos operacionais e financeiros, controlar o processo até à última falha (Allison, 2010).

Relativamente aos dados **censurados à esquerda**, Ryan (2007) caracteriza este tipo de censura, denominada **Tipo II**, quando já ocorreram falhas antes do início do estudo num ou mais bens.

Na Figura 3.1 encontram-se representados ambos os tipos de informação censurada para um período de ensaio T ($\tau_A - \tau_0$). Considerando o sistema com quatro falhas, representadas por triângulos, verifica-se que t_1 ($\tau_1 - \tau_0$) corresponde a um dado censurado à esquerda uma vez que a falha ocorreu antes do início do estudo. De forma simétrica, verifica-se que t_3 ($\tau_A - \tau_2$) corresponde a um dado censurado à direita pelo facto da falha 4 ter ocorrido após o término do estudo (Dias, 2002). Além de ambos os tipos de censura, encontra-se ainda representado o intervalo censurado, dado por \tilde{t} , que demonstra o intervalo de tempo para o qual o bem encontra-se em funcionamento no instante inicial e em falha no instante final (falha 3).

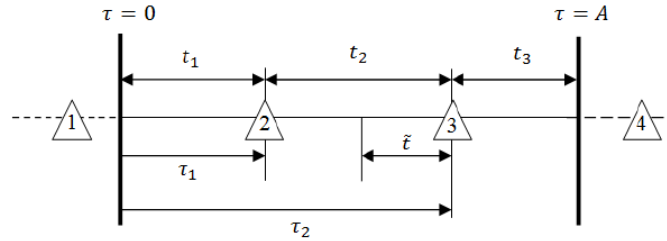


Figura 3.1 – Informação censurada (Adaptado de Dias (2002)).

3.3. Análise Estatística das Falhas

De acordo com Marques (2009), o ponto de partida para modelar uma variável aleatória na generalidade das áreas da estatística é a distribuição Normal. No entanto, a aplicabilidade desta distribuição no contexto da fiabilidade requer algumas precauções aquando da presença de dados de tempos desde a última falha, cujos valores são sempre positivos. Nesse sentido, a distribuição de *Weibull* apresenta-se como a mais adequada e utilizada nesta área.

Considerando T uma variável aleatória não negativa, representativa do tempo desde a última falha, a sua distribuição de probabilidade pode ser especificada através de diversas formas. Em particular na área da fiabilidade, a função de Fiabilidade ou Sobrevivência, função de Densidade de Probabilidade e função de Risco são as que mais utilidade apresentam (Dias, 2002).

Função de Fiabilidade ou Sobrevivência

Segundo Allison (2010), a função de fiabilidade, $R(t)$, é definida para valores contínuos e discretos, como a probabilidade da variável T ser igual ou superior a um determinado valor de t , como representado na seguinte expressão:

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \quad , \quad 0 < t < \infty \quad (3.1)$$

Pelo facto de $R(0) = 1$ e $R(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$, $R(t)$ é uma função contínua monótona decrescente. Designada por $F(t)$, a função de distribuição cumulativa (f.d.c.) de T representa a probabilidade da variável ser inferior a qualquer valor de t previamente definido, tal como representado na seguinte expressão:

$$F(t) = P(T < t) = \int_0^t f(u) du \quad (3.2)$$

Função Densidade de Probabilidade

Tendo em conta que se está perante variáveis contínuas, Allison (2010) afirma ainda que a função densidade de probabilidade (F.d.p.), $f(t)$, é descrita pela derivada da f.d.c, originando a seguinte expressão:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} \right) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Função de Risco

Além das duas funções apresentadas, é ainda possível segundo Allison (2010) descrever a distribuição de probabilidade de T através da função de risco, $h(t)$, dada por:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \right) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.4)$$

A função de risco define a taxa instantânea de falha em t , dado que o sistema não falhou até esse instante, traduzindo-se desse modo numa probabilidade condicionada onde se pretende determinar a probabilidade de uma falha ocorrer num intervalo $t+\Delta t$, sabendo que ainda não avariou até t .

Relacionando as três funções aqui apresentadas por recurso à Equação 3.4, obtém-se uma nova expressão para $h(t)$:

$$h(t) = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (3.5)$$

Desenvolvendo a expressão em ordem a $R(t)$ e considerando que $R(0) = 1$, obtém-se a seguinte função geral de fiabilidade:

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(u) du} = e^{-H(t)} \quad (3.6)$$

Caso $h(t)$ seja constante – dada por uma taxa de falhas constante λ , isto é, caso se esteja perante um sistema com intervalos de tempo exponencialmente distribuídos, a Equação 3.6 assume a seguinte forma:

$$R(t) = e^{(-\lambda \times t)} \quad (3.7)$$

3.3.1. Estimador não Paramétrico da Função de Fiabilidade

A adopção de métodos não paramétricos em estudos de fiabilidade apresenta como grande vantagem a não necessidade de conhecer a distribuição de probabilidade dos intervalos de

tempo entre falhas, possibilitando uma estimação e comparação de variáveis estatísticas (O'Connor, 1991).

Nesse sentido, Allison (2010) apresenta o estimador de *Kaplan-Meier* como o método mais utilizado neste tipo de estimativas. Conhecido igualmente como estimador do Produto Limite, foi demonstrado em 1958 pelos respectivos autores da sua designação que o mesmo corresponde ao estimador não paramétrico que maximiza a função da máxima verosimilhança.

Nas situações de inexistência de dados censurados ou de existência apenas à direita, a aplicação deste estimador revela-se bastante simples e intuitiva. Significa isto que a fiabilidade corresponderá simplesmente à proporção de observações da amostra que apresentem tempos de falha superiores a t (no caso de inexistência de dados censurados) ou inferiores a c (no caso da existência de dados censurados à direita em que todos os casos de censura terminam a um mesmo instante c , sendo os tempos de falha observados inferiores a este).

Segundo Dias (2002), a análise de dados temporais deve incluir sempre que possível os dados correspondentes a tempos desde a última falha censurada. Deste modo, considere-se então que $t_1 < t_2 < t_k$ corresponde ao tempo observado desde a última falha numa amostra de dimensão n , correspondente a uma população homogénea com uma função de fiabilidade $R(t)$. Considerando ainda que se está perante dados censurados conhecidos (t_{jl}) , a função de máxima verosimilhança (L) é dada através da seguinte expressão:

$$L = \prod_{j=0}^k \left\{ [R(t_j) - R(t_j + \Delta t)]^{d_j} \times \prod_{l=1}^{m_j} R(t_{jl} + \Delta t) \right\} \quad (3.8)$$

Tendo em conta que a função de fiabilidade é descontínua nos pontos onde se observam as falhas, considere-se então que $t_{jl} \geq t_j$. Neste caso, $R(t_{jl} + \Delta t)$ é maximizado procedendo à transformação de $R(t_{jl} + \Delta t) = R(t_j + \Delta t)$ e $R(t_{0l}) = 1$. Uma vez que a maximização de L é dada pelo estimador $\hat{R}(t)$, discreto em t_j , a probabilidade de falha obtém-se para esse mesmo instante através da relação da Equação 3.4, onde $R(t_j)$ representa a fiabilidade dos sistemas não falharem no instante j .

Sendo $\hat{R}(t)$ conhecido igualmente por estimador de *Kaplan-Meier*, este é definido através da seguinte expressão:

$$\hat{R}(t) = \prod_{j|t_j < t} \left(1 - \frac{d_j}{n_j} \right) \quad (3.9)$$

3.3.2. Distribuição de Weibull

Segundo Feldman & Valdez-Flores (2010), a distribuição de *Weibull* surgiu em 1939 pelas “mãos” do engenheiro sueco *Waloddi Weibull* resultante da necessidade de descrever a resistência de diversos materiais à ruptura. Desde então, muitos estatísticos têm vindo a

demonstrar a utilidade desta distribuição no que respeita a descrever o tempo t até à falha em diversos tipos de sistemas. Dodson (2006) apresenta como exemplos os sistemas electrónicos e os pneus dos automóveis. Saleh & Castet (2011) consideram inclusive que esta distribuição é bastante flexível no que respeita à possibilidade de modelar diferentes tipos de comportamento de falhas, nomeadamente taxas de falha crescentes, decrescentes ou constantes.

De acordo com Dodson (2006), a distribuição de *Weibull* é caracterizada por três parâmetros, nomeadamente pelo **parâmetro de escala (α)** – também conhecido por vida característica, pelo **parâmetro de forma (β)** e pelo **parâmetro de localização (δ)** – também conhecido por vida mínima segundo O'Connor (1991). Contudo, apenas são utilizados tradicionalmente os dois primeiros para a modelação dos tempos de falha, assumindo-se que o último é zero, pois aquando do início do estudo ($t = 0$), o sistema já experimentou uma falha (O'Connor, 1991).

Nesse sentido, e de acordo com Ryan (2007), a F.d.p. é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \times \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \times \left(e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \right) \quad (3.10)$$

Em termos de função de fiabilidade, esta traduz-se na seguinte expressão:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3.11)$$

Por recurso à Equação 3.4, obtém-se a função de risco, dada por:

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \times \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (3.12)$$

Observando a expressão anterior, verifica-se que $h(t)$ é influenciada pelo valor que o parâmetro de forma assume. Assim, na Figura 3.2 encontra-se representado a evolução da F.d.p. da distribuição de *Weibull* para diversos valores do parâmetro. Facilmente se verifica que nos casos em que $0 < \beta < 1$, $h(t)$ diminui e a F.d.p. da distribuição de *Weibull* aproxima-se da distribuição Gama. Por outro lado, nos casos em que $\beta = 1$, a F.d.p. é equivalente à distribuição Exponencial Negativa. Por sua vez, para valores de $\beta > 1$, onde se verifica um aumento de $h(t)$, a F.d.p. tende para a distribuição Normal (correspondendo exactamente quando $\beta = 3,6$) (Dodson, 2006).

Relativamente aos intervalos de confiança, estes podem ser determinados através de dois métodos distintos, nomeadamente pelo método da máxima verosimilhança, do inglês *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), ou pelo método de estimativa gráfica (Dodson, 2006).

De acordo com Saleh & Castet (2011), que apresenta uma descrição pormenorizada da modelação matemática de ambos os métodos, existem vantagens e desvantagens em adoptar

um ou outro método tanto para a determinação dos intervalos de confiança como para a estimativa dos parâmetros α e β .

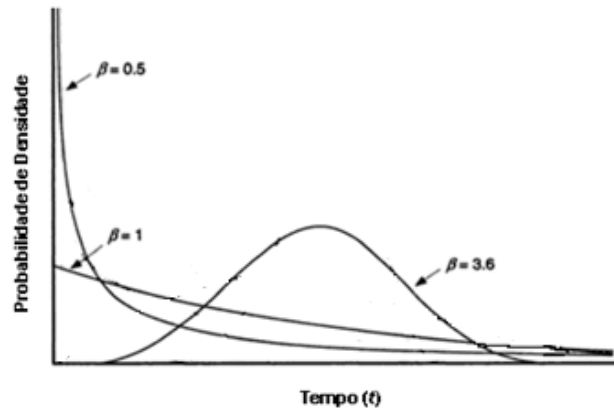


Figura 3.2 – Evolução da F.d.p. da distribuição de *Weibull* para diversos valores de β (Adaptado de Dodson (2006)).

Dito isto, a utilização do método por estimativa gráfica permite obter, através de uma simples regressão dos dados, uma estimativa para ambos os parâmetros visualizando-se de imediato os resultados aferidos. Em contra-partida, e comparativamente ao MLE, este método apresenta a desvantagem de não ser muito preciso nas estimativas encontradas, resultado da incorrecta atribuição de pesos às falhas (as primeiras – mais antigas, têm maior peso que as últimas – mais recentes) aquando das sucessivas transformações logarítmicas. Através do método MLE, que o autor define como sendo a probabilidade de gerar dados de uma determinada distribuição paramétrica escolhida, a partir de uma amostra de dados observados, assumindo que α segue uma distribuição paramétrica de parâmetros desconhecidos, esta questão é resolvida.

3.4. Sistemas Reparáveis

De acordo com Ascher & Feingold (1984), um sistema é considerado reparável (SR) quando após ter falhado o cumprimento de pelo menos um das funções requeridas, possa ser restaurado para desempenhar, de forma satisfatória, todas as funções requeridas por um qualquer método que não implique a substituição na íntegra de todo o sistema.

Sendo o sistema reparado (ajustado, lubrificado, apertado, etc) até à próxima avaria, Assis (2004) afirma que este dificilmente voltará à condição de novo. Segundo Ascher & Feingold (1984) e Thompson (1988) citados por Ghosh & Majumdar (2011), esta teoria é apoiada pelos autores que afirmam ser bastante difícil trazer o sistema a uma condição apelidada de *Same as New*, onde se assiste a uma reparação perfeita resultante de acções de manutenção/reparação. No entanto, assiste-se frequentemente a reparações mínimas ou imperfeitas em sistemas, deixando respectivamente os mesmos em igual estado antes e após

a reparação – *Same as Old* ou num estado de aparente melhoria – *Better than Old*. Ainda que pouco frequente, assiste-se por vezes a reparações que deixam o sistema num estado pior que o antecedente – *Worse than Old*.

Num estudo desenvolvido por Van Horenbeek *et al.* (2012), os autores questionam o impacto de implementar um ou outro tipo de reparação nos sistemas, visto que em muitos casos a decisão adoptada acaba por ser a errada. A título de exemplo, substituindo um componente avariado por um novo num sistema não significa que este atinja *à priori* a condição de *Same as New*, podendo inclusive verificar-se um resultado oposto, em que se deixa o sistema num pior estado. Com o intuito de não incorrer em decisões erradas, os autores sugerem que se proceda à aplicação de manutenção baseada na condição com revisões contínuas ou periódicas de forma a acompanhar o sistema e com isso, intervir da melhor forma.

3.4.1. Tendência dos Dados

Além do estudo quantitativo das falhas num sistema, é igualmente importante analisar a sua evolução ao longo do tempo, recorrendo-se desse modo à observação das variações na taxa de falhas.

Segundo O'Connor (1991), a taxa de falhas, do inglês *Rate of Occurrence of Failures* (ROCOF) expressa instantaneamente a probabilidade de falha por unidade de tempo, quando várias falhas podem ocorrer num período de tempo contínuo. Segundo o autor, existem três tipos de comportamento que a taxa de falhas pode tomar, nomeadamente Crescente, Decrescente ou Constante, sendo estas vulgarmente representadas pela chamada curva da banheira (Ryan, 2007).

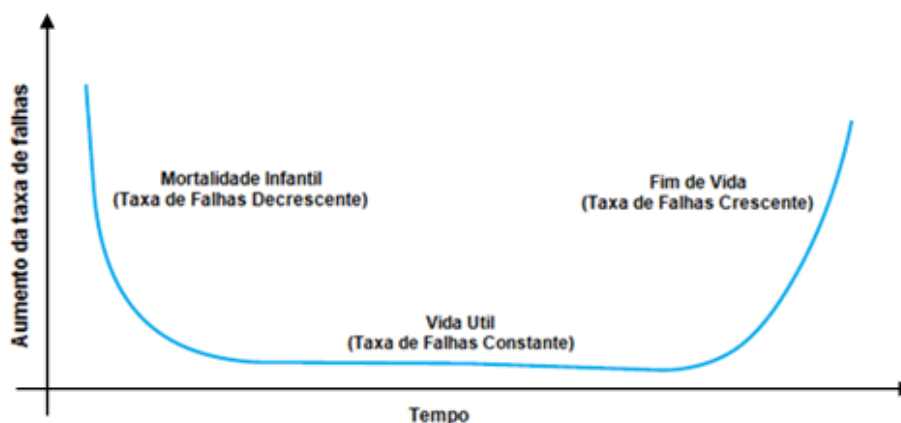


Figura 3.3 – Curva da banheira (Adaptado de Ryan (2007)).

Sistemas com Taxa de Falhas Decrescente (Modelo de Crow)

Sendo este tipo de taxa de falhas representativo do período de infância dos sistemas, assiste-se a uma elevada incidência de falhas pelo facto dos mesmos estarem a ser utilizados pela primeira vez, podendo mesmo verificar-se em alguns casos a existência de defeitos de fabrico (Ryan, 2007). Segundo O’Connor (1991), esta elevada incidência de falhas pode igualmente ser resultante dos sistemas serem sujeitos a ensaios de funcionamento sob condições de stress, antes de serem entregues ao cliente. As peças que falham são rejeitadas, tornando-se a população sobrevivente mais fiável, esperando-se deste modo que as falhas tendam a diminuir com o passar do tempo. No caso específico dos equipamentos electrónicos, este fenómeno é conhecido como *Burn-in*. Desta forma, as taxas de falha decrescentes observam-se em equipamentos que se tornam menos susceptíveis de falhar com o aumento do tempo da sua sobrevivência.

De acordo com Dias (2002), os sistemas com tendência para uma taxa de falhas decrescente podem ser analisados pelo Modelo de “Fiabilidade Crescente”, conhecido igualmente por Modelo de Crow. Tendo sido desenvolvido em 1974 pelo próprio autor que tornou conhecido o método, este constitui uma reformulação de um modelo anteriormente apresentado, o Modelo de Duane.

Através do modelo de Crow é possível determinar uma estimativa da taxa de falhas, assim como uma estimativa do MTBF para as falhas mais recentes, para um determinado intervalo de confiança.

Sendo a taxa de falhas representada por $\rho(\tau)$, esta é calculada através da seguinte expressão:

$$\rho(\tau) = \hat{\lambda} \times \hat{\beta} \times \tau^{\hat{\beta}-1} \tag{3.13}$$

Onde $\hat{\lambda}$ e $\hat{\beta}$ representam as constantes do modelo e τ o tempo total de duração do teste. Neste caso, não se confunda $\hat{\lambda}$ e $\hat{\beta}$ do modelo de Crow com a taxa de falhas λ da distribuição exponencial negativa e o parâmetro de forma β da distribuição de Weibull.

Sendo as estimativas das constantes obtidas através da função de máxima verosimilhança, o cálculo destas depende do tipo de teste que se efectue. No caso de o teste ser limitado pelo tempo, as estimativas são dadas por:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln\left(\frac{T_0}{\tau_i}\right)} \tag{3.14}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T_0^{\hat{\beta}}} \tag{3.15}$$

Onde τ_i corresponde ao tempo de vida da falha no instante i e n_f ao número total de falhas registadas durante o período de teste T_0 considerado. No caso de o teste ser limitado pelo número de falhas, as constantes apresentam uma estimativa determinada por:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f-1} \ln\left(\frac{T_{n_f}}{\tau_i}\right)} \quad (3.16)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T_{n_f}^{\hat{\beta}}} \quad (3.17)$$

Onde T_{n_f} corresponde ao tempo total do ensaio, terminando no instante exacto de ocorrência da última falha.

A estimativa do MTBF é portanto dada através da seguinte expressão:

$$\hat{\theta}(\tau) = \frac{1}{\rho(\tau)} \quad (3.18)$$

Associado ao valor de MTBF estimado existe um intervalo de confiança calculado através das seguintes expressões:

$$\hat{\theta}_i(\tau) = \hat{\theta}(\tau) \times \pi_1 \quad (3.19)$$

$$\hat{\theta}_s(\tau) = \hat{\theta}(\tau) \times \pi_2 \quad (3.20)$$

Correspondendo respectivamente as Equações 3.19 e 3.20 ao Limite Inferior e Superior do intervalo em que o teste é limitado pelo tempo. Os valores das constantes π_1 e π_2 obtêm-se directamente da Tabela do modelo, presente no Anexo B. No caso de o teste ser limitado pelo número de falhas, as Equações 3.19 e 3.20 são exactamente iguais diferindo apenas as constantes que agora, ao serem representadas por ρ_1 e ρ_2 , apresentam os seus valores numa outra tabela do mesmo anexo.

Sistemas com Taxa de Falhas Constante

De acordo com Ryan (2007), a taxa de falhas constante surge após a taxa anteriormente descrita, verificando-se uma diminuição do índice de falhas para um nível inferior que manter-se-á constante por um longo período de tempo, conhecido por vida útil do sistema.

Segundo O'Connor (1991), este tipo de taxa de falhas é característico de sistemas complexos sujeitos a reparações e revisões gerais, onde os seus diversos componentes apresentam diferentes padrões de falha ao longo do tempo resultante do facto destes apresentarem

diferentes idades devido às reparações ou substituições. As taxas de falha constantes são ainda indicativas de falhas induzidas nos sistemas por causas externas.

Em termos de indicadores de desempenho, a fiabilidade dos SR é quantificada para este tipo de falhas através do MTBF e MTBF mínimo garantido, recorrendo-se por sua vez ao indicador MTTF para caracterizar os SNR.

Sistemas com Taxa de Falhas Crescente

Segundo O'Connor (1991), está-se perante uma taxa de falhas crescente quando se assiste a uma predominância de falhas por desgaste dos sistemas, sendo essa taxa mais significativa à medida que se aproxima o fim de vida dos mesmos. À semelhança das taxas de falha decrescentes, estas obedecem igualmente a um PPNH pelas mesmas razões apresentadas, assistindo-se neste caso a uma fiabilidade decrescente nos sistemas.

Processos Estocásticos Pontuais – Processos de Poisson

Sendo os processos estocásticos processos que ocorrem de forma aleatória ao longo do tempo, estes podem ser do tipo contínuo ou discreto. Dentro dos processos discretos, destacam-se os pontuais no que respeita ao estudo da fiabilidade, visto possibilitarem uma descrição das séries de acontecimentos que ocorrem aleatoriamente no tempo (Gupta *et al.*, 2010).

De acordo com Dias (2002), existem diversos modelos estocásticos pontuais de entre os quais se destacam os Processos de Poisson Homogéneos e Não Homogéneos, visto serem estes os que apresentam interesse para o presente estudo.

Processo de Poisson Homogéneo (PPH)

Sendo os PPH caracterizados por uma sequência infinita de variáveis aleatórias positivas, exponencialmente distribuídas e independentes e identicamente distribuídas (i.d.d.), estes correspondem a todos os processos de Poisson para os quais a taxa de falhas é constante. Assim, de acordo com Ascher & Feingold (1984), um processo estocástico pontual $\{N(t), t \geq 0\}$ é um PPH nas condições de:

- $N(0) = 0$;
- $\{N(t), t \geq 0\}$ é aumentado de forma independente;
- O número de falhas em qualquer intervalo de tempo Δt segue uma distribuição de Poisson com um valor médio $m = \lambda_0 \times \Delta t$.

Deste modo, a probabilidade de ocorrência de n_f falhas num intervalo de tempo Δt é dada pela seguinte expressão:

$$P\{N(\Delta t) = n_f\} = \frac{e^{-m} \times m^{n_f}}{n_f!} \quad (3.21)$$

Representando λ_0 a taxa de falhas, a fiabilidade de um sistema que falhe segundo um PPH, isto é, com uma função densidade de probabilidade Exponencial Negativa, obtém-se da seguinte forma:

$$R(\Delta t) = e^{-\lambda \times \Delta t} \quad (3.22)$$

Processo de *Poisson* Não Homogéneo (PPNH)

Ao contrário dos PPH, os PPNH são caracterizados por taxas de falhas que apresentem tendência nos seus dados, isto é, uma relação de dependência com o tempo. Deste modo, essa tendência pode traduzir-se num aumento da incidência de falhas, comprovando-se a presença de uma taxa de falhas crescente, ou em situação oposta a uma redução dessa mesma incidência assistindo-se à presença de uma taxa de falhas decrescente.

Uma vez conhecidos os tipos de taxa de falhas e respectivos processos estocásticos, importa agora conhecer um teste que permita identificar qual destes é o que melhor caracteriza uma amostra de tempos de falha. Nesse sentido, Ansell & Phillips (1994) apresentam dois testes vulgarmente utilizados, o teste de *Laplace* – desenvolvido por *Cox* e *Lewis* em 1966 e o teste *Military Handbook* (MIL-HDBK-189) desenvolvido em 1981. De seguida apenas será apresentada a descrição do teste de *Laplace*, sendo possível consultar a descrição do teste MIL-HDBK-189 na obra publicada pelos autores.

3.4.2. Teste de *Laplace*

De acordo com Assis (2004), o teste de *Laplace* é um teste estatístico não paramétrico, que permite identificar se os tempos de falha de uma amostra são independentes ou não entre si, ou seja, se apresentam tendência (crescente ou decrescente) ao longo do tempo.

Assim, assume-se à partida a hipótese nula (H_0), considerada verdadeira, onde os tempos entre falhas são considerados independentes. Deste modo, comprova-se a presença de um PPH visto que a taxa de falhas é constante ou aproximadamente constante. Por outro lado, caso H_0 não seja verdadeira, aceita-se a hipótese alternativa (H_1) como resultado dos tempos entre falhas apresentarem dependência entre si. Assim, esta hipótese é representativa da

presença de uma taxa de falhas não constante em que a mesma obedece a um PPNH, cujos tempos entre falhas apresentam tendência (Assis, 2004).

Dito isto, o teste de hipótese é dado por:

H_0 : Taxa de falhas constante (PPH)

H_f : Taxa de falhas não constante (PPNH)

Caso o teste seja **limitado pelo tempo**, a estatística de teste (Z_0) é definida como:

$$Z_0 = \left(\sqrt{12 \times n_f} \right) \times \left(\frac{\sum_1^{n_f} t_i}{T_0 \times n_f} - 0,5 \right) \quad (3.23)$$

Caso o teste seja **limitado pelo número de falhas**, Z_0 assume a seguinte expressão:

$$Z_0 = \left(\sqrt{12 \times (n_f - 1)} \right) \times \left(\frac{\sum_1^{n_f-1} t_i}{T_0 \times (n_f - 1)} - 0,5 \right) \quad (3.24)$$

Tendo em conta que no pressuposto de um PPH, Z_0 tende para uma distribuição Normal Reduzida (com um determinado valor de $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ ⁵, consoante o valor de α considerado), H_0 será rejeitada quando $|Z_0| > Z_{\frac{\alpha}{2}}$. Desta forma, para valores negativos de Z_0 , comprova-se a presença de um PPNH com taxa de falhas decrescente, comprovando-se por sua vez a presença de um PPH com taxa de falhas crescente nos casos em que Z_0 assume valores positivos.

⁵ Os valores de $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ encontram-se na Tabela de Distribuição Normal, presente no Anexo C.

Parte II

Capítulo 4

Análise Estatística Global da Frota

1. Bem Reparável em Estudo
2. Estrutura da Informação em Análise
3. Análise Estatística Global das Falhas

À semelhança do Capítulo 2, toda a informação descritiva contida no presente capítulo e no capítulo seguinte foi igualmente disponibilizada pela EMEF, sendo na sua grande maioria facultada em específico pela OMMC.

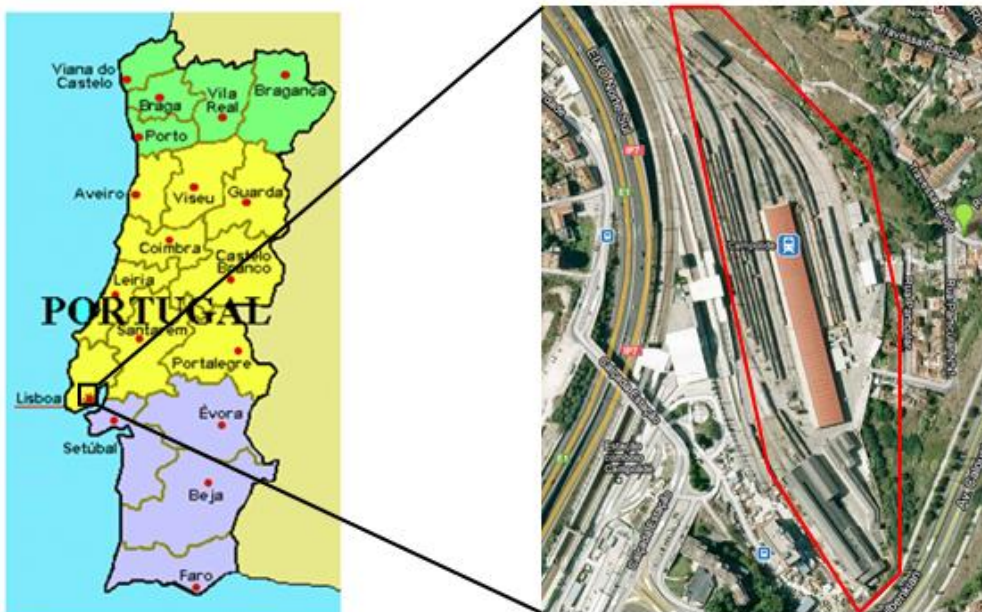


Figura 4.1 – Oficina de Manutenção de Material da EMEF, em Campolide.

4.1. Bem Reparável em Estudo

Neste subcapítulo pretende-se desde logo dar a conhecer aos leitores o bem reparável em análise e respectivas características gerais, devido à enorme complexidade que o mesmo apresenta. Dito isto, a frota de automotoras S2300, operada pela OMMC constitui o bem reparável em estudo da presente dissertação.



Figura 4.2 – Automotora S2300.

Com a assinatura do consórcio dos fabricantes *Siemens-Sorefame*, as automotoras S2300 são veículos destinados ao transporte público de passageiros em contexto de serviço suburbano, nas linhas de Sintra, Azambuja e Sado, como representado na Figura 4.3.

A atribuição das automotoras às linhas para efeitos de serviço comercial decorre segundo um sistema de rotação específico, no qual existem simultaneamente automotoras disponíveis e automotoras em reserva, estas últimas em minoria quantitativa. Efectuando serviço comercial durante os 7 dias da semana, estas automotoras percorrem diariamente uma distância média de 350 e 800 Km, consoante a linha à qual estejam atribuídas (Sintra/Azambuja ou Sado, respectivamente).



Figura 4.3 – Rede das linhas férreas, alvo de circulação das automotoras S2300. (Adaptado de CP (2013)).

A EMEF apresenta ao seu encargo a manutenção de 42 unidades da S2300, tendo a primeira unidade iniciado serviço comercial em Setembro de 1992. Numa segunda fase, em Outubro de 1997, entrariam ao serviço comercial 14 novas unidades pertencentes à série 2400, bastante semelhantes⁶.

Ambas as séries de automotoras, com capacidade para 870 passageiros, constituíram até Outubro de 1999 o conjunto de aquisições mais recentes efectuadas pela CP, data à qual viriam a ser adquiridas 12 automotoras eléctricas da série 3500. A última aquisição efectuada, datada de Fevereiro de 2009, é representada pela frota de 25 locomotivas eléctricas da série 4700.

Actualmente, por questões essencialmente de planeamento estratégico financeiro da CP, apenas 50 das 56 unidades das S2300/2400 integram a frota comercial. De entre as unidades activas, 6 encontram-se imobilizadas por motivos diversos, sendo da responsabilidade da EMEF garantir que 44 unidades se apresentam disponíveis diariamente para serviço comercial. De forma a evitar a supressão de serviços, estas 44 unidades incluem 3 unidades de reserva.

O bem reparável em estudo apresenta a designação de UQE visto que é constituído por quatro unidades eléctricas, *Unit Quadruple Electric*, duas motoras (MY) e duas reboque (RY), dispostas de forma simétrica, como representado na Figura 4.4. Por razões de nomenclatura, cada meia UQE, isto é, uma unidade motora e uma reboque, encontra-se numerada (entre 2301 e 2342) com um respectivo diferencial de 50 da numeração da outra meia UQE (entre 2351 e 2392).

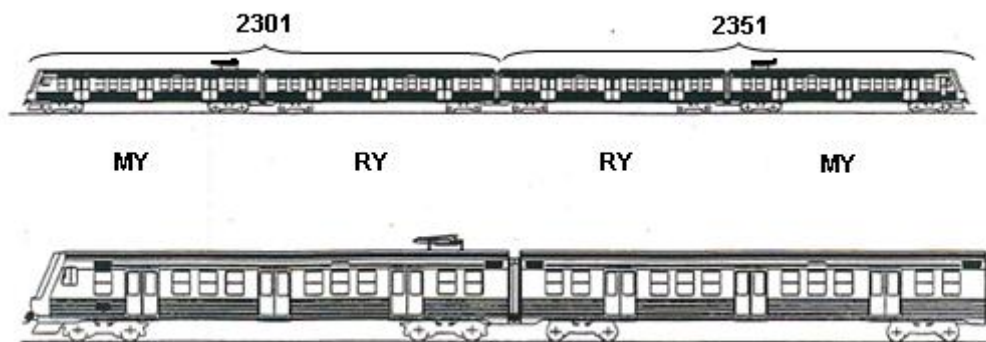


Figura 4.4 – Constituição física da UQE 2301.

Conhecida a sua constituição física, as UQE S2300 apresentam ainda as seguintes características técnicas presentes no Quadro 4.1.

⁶ A principal distinção reside no facto de as UQE S2400 estarem equipadas de origem com sistema de ar condicionado, ao contrário das UQE S2300 que apenas vieram a ser alvo dessa modificação algum tempo após encontrarem-se em circulação comercial.

Características Gerais		Características de Funcionamento	
Comprimento	95,59m	Tensão de Alimentação	25KV a 50Hz
Largura	3,02m	Potência Nominal	3100KW
Altura	3,88m	Esforço de Tracção no Arranque	277KN
Bitola da Via	1,668m	Velocidade Máxima	120Km/h
Disposição dos Rodados ⁷	<i>Bo´Bo´+2´2´+2´2´+Bo´Bo´</i>	-	-
Lotação		Carga	
Passageiros sentados	316	Normal	45,36ton
Passageiros de pé (máximo)	554	Máxima	60,9ton
Passageiros de pé (sobrecarga)	668	Sobrecarga	68,88ton
Total carga máxima	870	Tara	180,4ton
Total sobrecarga	984	-	-

Quadro 4.1 – Características técnicas das UQE S2300.

4.2. Estrutura da Informação em Análise

O principal objectivo do presente estudo consiste em determinar qual ou quais os bens reparáveis que mais contribuem para o decréscimo da fiabilidade do serviço prestado pela frota de automotoras. Nesse sentido, a principal fonte de informação baseia-se nas falhas registadas pela empresa ao nível operacional, que recaem sobre a sua alçada, tal como será explicado mais adiante.

De forma a proceder-se à análise estatística da frota, começou-se por efectuar um levantamento do histórico das falhas através da consulta da plataforma de base de dados *InfoTec*. Concebida pela EMEF, esta plataforma permite a inserção das falhas no sistema de forma uniformizada, assim como a fácil consulta de informação técnica, de forma vertical a toda a estrutura da empresa.

Tal como representado na Figura 4.5, os técnicos de manutenção procedem ao registo de diversas informações, nomeadamente à data de entrada da automotora no PO, à identificação da automotora em que ocorreu a avaria e à identificação do bem reparável. Esta última é efectuada desde o bem mais abrangente – Grupo de sistemas, até ao mais pormenorizado componente – *Line Replacement Unit* (LRU), complementada por um código respectivo. A título de exemplo, o código LRU *CTR0302* corresponderá a uma avaria ocorrida no LRU *02, Gate Unit*, que se encontra ao abrigo do Subsistema *03, Rectificador*, que por sua vez pertence ao

⁷ Disposição segundo Sistema de Classificação de locomotivas desenvolvido pela União Internacional de Caminhos de Ferro (UIC). Cada MY possui dois *bogies* (*Bo´Bo´*), cada um dotado de dois eixos tractores individualmente propulsionados por um motor eléctrico. Por sua vez, cada RY possui dois *bogies* livres (*2´2´*).

Sistema Conversor de Tracção, *CTR*, um dos diversos que integram o Grupo de sistemas Circuito de Tracção. Além disso, é igualmente identificado o código RCM correspondente ao modo de falha do bem reparável em questão, e registada a descrição da avaria detectada, assim como as intervenções efectuadas, entre outras informações.

Nº Avaria: 4397 Nº Unidade: 2305 Veículo: Nenhum
 Data de Entrada: 2012-03-02 Data de Resolução: 2012-03-02 Revisado: Não Revisado
 Grupo de sistemas: Circuito de tracção Sistema: Conversor de tracção
 Subsistema: Rectificador LRU: Gate unit
 Código LRU: CTR0302 Codificada: Não Codificada
 Código RCM e Descrição do modo de falha: Nenhum
 Descrição do MF:
 Peça Substituída: Substituída Tipo de peça: Equipamento Nomenclatura: Qtd: 1
 Criar Nota E3 no SAP: Nota de Recuperação: Em garantia? Fora de Garantia
 Tem Acções Correctivas/Preventivas? Não Nºs de Acções Correctivas/Preventivas:
 Situação da avaria: Concluída Causa do Pendente: Aguarda peça Confirmada: Confirmada
 Pedir Relatório de Reparação: (Módulo a ser revisito!!!)
 Avarias Pendentes da Unidade: 0/0
 Avarias Pendentes: 0/0
 Avarias Concluídas: 0/0
 Chefe Responsável: Escolher:
 Anomalia Verificada: M2355: Avaria de Grupo 2.
 Intervenção/Peças Substituídas: Foi substituída a Gate Unit da fase U.
 Causas: Gate Unit da fase U avariada.

Figura 4.5 – Exemplo da listagem de informação na plataforma *InfoTec*.

Apesar da sua boa usabilidade, detectou-se que esta ferramenta apresentava um pequeno lapso funcional, nomeadamente a existência de registos duplicados referentes à mesma falha, situação a qual viria de imediato a ser corrigida. Segundo os técnicos no terreno, a ausência de algumas opções de registo são um outro ponto a referir, na medida em que se julga que estas poderão vir a acrescentar valor à plataforma para futuras análises de manutenção e fiabilidade. Incidir-se-á mais à frente, no Subcapítulo 6.1, sobre esta última questão.

Com o intuito de obter a modelação pretendida das falhas, foi necessário nesta fase inicial do estudo proceder a um exaustivo processo de recolha, interpretação e tratamento das falhas, visto que nem todos os dados se encontravam disponibilizados nos moldes pretendidos. Nesse sentido, foi necessário proceder para cada automotora, ao devido alinhamento entre a data das falhas, os quilómetros percorridos, o tipo de falha e o bem reparável em concreto onde esta foi registada.

Nesta fase, a documentação⁸ disponibilizada quer pela EMEF quer pela CP-Frota, viria a demonstrar-se bastante útil no que respeita à consulta dos quilómetros efectuados pelas automotoras.

Na fase inicial do estudo, nomeadamente da análise da evolução das falhas, decidiu-se adoptar como unidade de medida os quilómetros percorridos. Esta decisão foi tomada pois as automotoras nem sempre se encontram a prestar serviço comercial, daí a necessidade do referido alinhamento à base temporal diária. Exemplos disso mesmo são as automotoras que se encontram disponíveis em situação de reserva, prontas para entrar ao serviço caso exista essa necessidade, ou as situações de revisão periódica preventiva a que as automotoras estão sujeitas. O sistema de rotação das automotoras apresenta-se como uma outra justificação para o referido alinhamento de indicadores, uma vez que as automotoras percorrem troços diversos de distâncias distintas. Desta forma, pretende-se com este alinhamento que as conclusões aferidas do presente estudo venham a ser o mais fidedignas possível.

Ainda nesta fase inicial foram detectadas algumas incoerências de informação em registos de falhas na plataforma *InfoTec*, assim como o registo incompleto de alguns campos descritivos, nomeadamente os campos de identificação de qual o bem reparável responsável pela falha. Na sua grande maioria, as falhas em questão são referentes ao LRU *Gate Unit* do circuito de tracção. Em esclarecimento junto dos engenheiros e técnicos, viria-se a comprovar que estas situações resultam de erro humano. Com o intuito de avançar com a correcta análise estatística da frota, foi desta forma, necessário proceder a um trabalho minucioso de consulta de documentação em papel de forma a preencher os referidos campos com informação em falta.

Tendo em conta que o registo das falhas na plataforma digital decorre desde 1 de Janeiro de 2010, data de implementação da plataforma na EMEF, o universo de dados reporta ao período entre esta data e a data de início do presente estudo, 30 de Abril de 2012, o que perfaz um total de 851 dias de observação.

Pelo facto da frota de automotoras encontrar-se sensivelmente a metade do seu ciclo de vida, as mesmas têm vindo a ser alvo da revisão R2 desde 2006, sendo que actualmente apenas três aguardam por este tipo de intervenção. Em função disso, algumas das automotoras permaneceram inoperacionais durante um determinado intervalo de tempo, algures dentro da “janela de tempo” considerada. Por esta razão, e porque não faz sentido estudar o comportamento das automotoras durante esses mesmos intervalos, pois poderia ser induzido em erro, estes foram retirados à duração dos ensaios das respectivas automotoras, assim como os intervalos de tempo anteriores à R2. As situações de automotoras sem serviço

⁸ A documentação em causa foi obtida através do sistema de integração de informação SAP adoptado na empresa.

comercial atribuído⁹ sofreram igualmente o mesmo tratamento de dados. Esta abordagem fará, portanto, com que a duração do ensaio seja diferente de automotora para automotora.

Tal como já aqui referido, foi também necessário nesta fase ter em linha de conta o tipo de falha que caracteriza a mesma. Isto implica perceber desde logo a distinção entre dois conceitos de falha, nomeadamente entre o conceito de ocorrência e incidente.

Uma ocorrência pode ser definida como sendo toda a perturbação que ocorre durante o período de circulação, isto é, durante o serviço comercial. A título de exemplo, as ocorrências podem traduzir-se em actos de vandalismo, queda de pessoas à linha, falhas mecânicas/electrónicas ou obras na linha. Por sua vez, um incidente pode ser definido como toda a ocorrência que implique socorro, supressão ou atraso da circulação do material circulante (tanto à partida quanto à chegada), superior a 5 minutos no caso de circulações suburbanas ou 30 minutos no caso da circulação de mercadorias. Por outras palavras, pode afirmar-se que um incidente é a causa da paragem do material circulante.

Conhecidos ambos os conceitos, importa agora conhecer apenas as ocorrências e incidentes relacionadas directamente com a manutenção, visto serem estas as que interesse terão para a EMEF em termos analíticos. Nesse sentido, a empresa apresenta-se dotada de um Sistema de Classificação de Avarias e Incidentes (SCAI), apresentado no Anexo D o qual contempla três tipologias de falha, nomeadamente as falhas do Tipo X, Tipo Y e Tipo Z. Estas tipologias diferem entre si tanto pela própria natureza da falha, isto é, pela causa da sua origem, quanto pela entidade a quem imputar a responsabilidade de resolução da falha. Esta imputabilidade pode deste modo ser atribuída à EMEF, CP-Frota, ou a uma outra entidade como se trate por exemplo da REFER.

Tendo em conta estas características que diferenciam as tipologias, apenas foram consideradas para o presente estudo as falhas classificadas como sendo do Tipo Z, isto porque as mesmas referem-se às falhas de material e manutenção e encontram-se única e exclusivamente ao abrigo da responsabilidade da EMEF. Pelo facto de as restantes tipologias de falha apresentarem causas alheias ao material e manutenção propriamente dita, bem como apresentarem imputabilidade externa à EMEF, estas foram desprezadas da presente análise. Assim, deste ponto em diante, sempre que for mencionado o vocabulário *Falhas* referir-se-á a todas as falhas oriundas de ocorrências e incidentes classificados como sendo do tipo Z.

No período em análise, entre ocorrências e incidentes classificados como falhas do tipo Z, registaram-se 1096 falhas.

Uma vez conhecida toda a informação relevante referente às falhas, está-se portanto, em condições de avançar para a análise estatística global da frota.

⁹ Automotoras excluídas do sistema de rotação da frota pelo facto de apresentarem avarias de natureza desconhecida que condicionam o seu funcionamento, ou por aguardarem a substituição de elementos avariados que actualmente a EMEF não possui em *stock*.

4.3. Análise Estatística Global das Falhas

No presente subcapítulo, será apresentada a análise estatística global do bem reparável em estudo, isto é, a frota de automotoras S2300. Com o intuito de analisar a tendência dos sucessivos tempos de falha, testa-se a presença de eventuais PPH, aplicando o teste de *Laplace*. Tendo em conta que a frota é composta por 42 automotoras, a análise será efectuada automotora a automotora, de forma a aferir conclusões individuais. Nesse sentido, torna-se indispensável deste capítulo em diante, a referência às mesmas de forma particular, razão pela qual a distinção entre estas será feita através da sigla UQE associada ao número da automotora em questão (por exemplo, UQE 2301).

Após analisada a tendência das falhas para cada automotora, proceder-se-á, num contexto global da frota, à identificação dos bens reparáveis mais críticos com base na aplicação do Princípio de Pareto.

4.3.1. Evolução da Taxa de Falhas de cada Automotora

Com o propósito de analisar a evolução da sequência das falhas em cada uma das UQE, isto é, se a taxa de falhas é constante ou apresenta tendência crescente ou decrescente, procede-se à aplicação do teste de *Laplace*. Para isso, importa desde logo conhecer a duração do ensaio para o qual se analisará a evolução das falhas.

Tal como referido anteriormente, nem todas as automotoras estiveram disponíveis para serviço comercial durante os 851 dias. Nesse sentido, apresenta-se na Figura 4.6 um diagrama de *Gantt* com as actividades e respectivas durações que justificam a imobilização dessas mesmas automotoras, assim como a duração dos períodos considerados para o presente estudo.

Por observação da Figura 4.6, pode verificar-se que a UQE 2303, por exemplo, esteve com serviço atribuído durante 790 dias (230+560), de entre os quais apenas foram considerados para a análise da evolução das falhas os 560 dias após a R2, visto ser este o período que diz respeito às falhas mais recentes. No caso das restantes automotoras representadas, o raciocínio é análogo.

Uma vez conhecido o período temporal de funcionamento das automotoras e tendo em conta o devido alinhamento dos quilómetros percorridos, está-se em condições de avançar para o teste de *Laplace*. De forma a não tornar o capítulo demasiado extenso, até porque a análise estatística das diversas automotoras é análoga, apenas será aqui descrita a análise de duas automotoras que apresentam, respectivamente, uma taxa de falhas decrescente e constante.

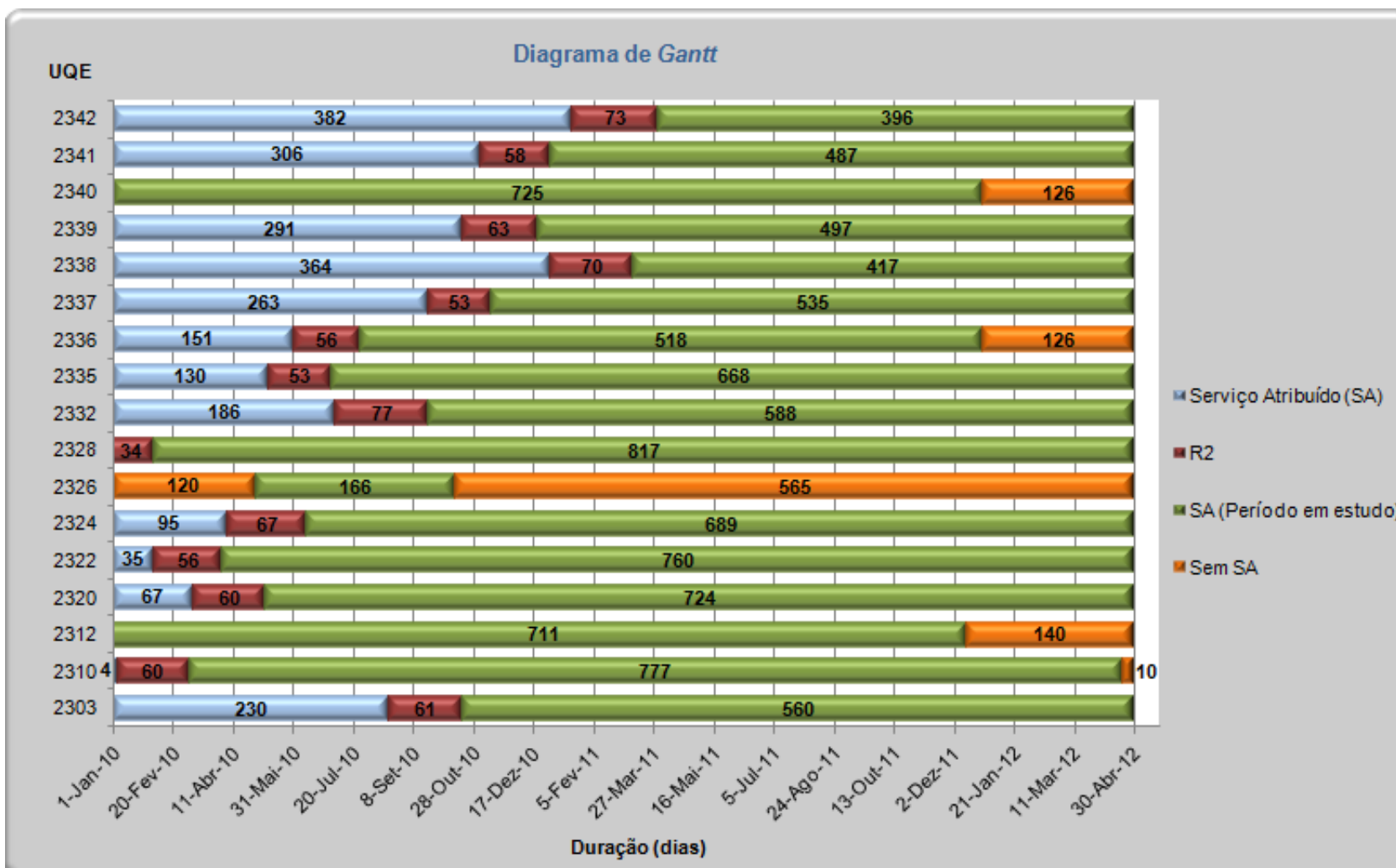


Figura 4.6 – Diagrama de Gantt das automotoras que não permaneceram em serviço comercial durante os 851 dias de observação.

Considerando a título de exemplo a UQE 2303, começou-se por determinar o valor de Z_0 , com recurso à Equação 3.23 e tendo em conta os dados recolhidos, representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Síntese dos parâmetros da UQE 2303, necessários à aplicação do teste de *Laplace*.

UQE 2303		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum r_i$ (Km)	562.724		
T (Km)	135.651	-2,64	1,65
α	0,10		
n_f	14		

Uma vez que $|Z_0| = 2,81 > Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,65$, rejeita-se H_0 para um nível de significância de 5%. Desta forma, conclui-se que se está perante um PPNH com taxa de falhas decrescente, uma vez que o valor de Z_0 é negativo, aferindo-se, portanto, uma tendência para o aumento dos intervalos de tempo entre falhas. Desde logo poderá afirmar-se que a automotora tem aumentado a sua fiabilidade ao longo do tempo, situação que demonstra que as acções de manutenção a que esta tem sido sujeita, têm impacto na melhoria da fiabilidade da mesma.

Para uma melhor interpretação do teste de *Laplace*, apresenta-se na Figura 4.7 a análise gráfica da UQE 2303.

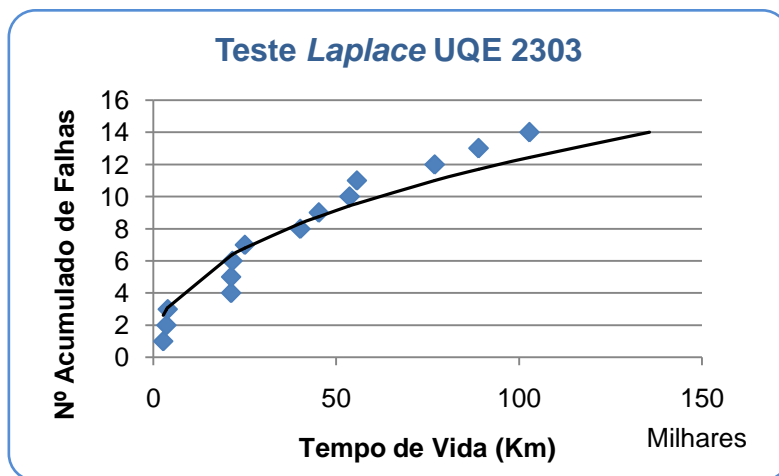


Figura 4.7 – Representação gráfica do teste de *Laplace* para a UQE 2303.

Por observação da Figura 4.7, pode-se desde logo verificar que não é possível ajustar uma recta ao conjunto de pontos apresentados, comprovando-se assim a presença de um PPNH.

Na Figura 4.7 é ainda possível observar a ocorrência de várias falhas no período inicial do tempo de vida da automotora, ainda que a situação não seja tão evidente quanto noutras automotoras (gráficos representados no Apêndice A2). À semelhança das restantes representadas na Figura 4.6, esta situação ocorre pela simples razão de se ter considerado o início dos ensaios após as automotoras terem regressado da revisão R2.

Tendo em conta o prolongado período de imobilização a que as automotoras estão sujeitas (cerca de 55 dias úteis), causas externas como humidade ou pó, provocam por si só a ocorrência de falhas anormais em bens electrónicos aquando da retoma das automotoras ao serviço. Por sua vez, estas causas externas aplicam-se igualmente nos casos em que as automotoras foram dispensadas de serviço atribuído. Uma outra razão para o registo de falhas anormais é o facto de algumas das automotoras terem sido alvo da substituição de equipamentos de natureza pneumática, comprovando, portanto, a presença de falhas de infância. Assim, pensa-se que estas razões contribuem significativamente para a obtenção dos resultados do teste de *Laplace*.

Tal como referido anteriormente, os sistemas com taxa de falhas decrescente podem ser analisados de acordo com o Modelo de *Crow*, o qual permite obter um intervalo de confiança para o MTBF. Tal como representado na Tabela 4.2, através do recurso à Equação 3.18, obteve-se uma estimativa para o MTBF. Posteriormente, com recurso às Equações 3.19 e 3.20, obtiveram-se os valores dos limites do intervalo de confiança do MTBF calculado.

Tabela 4.2 – Dados da UQE 2303 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2303			
$\hat{\beta}$	0,43	θ_s (Km)	48.860
$\hat{\lambda}$	0,09	Θ (Km)	22.694
ρ	$44,07 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	12.096

De acordo com o intervalo de confiança determinado, pode-se aferir que a UQE 2303 apresenta em 95% dos casos um MTBF mínimo garantido superior a 12.096 Km.

Considerando agora o caso da UQE 2312, representativo de uma automotora que apresenta uma taxa de falhas constante, apresenta-se na Tabela 4.3 o valor de Z_0 calculado através da Equação 3.23 para os dados recolhidos, que comprovam isso mesmo.

Tabela 4.3 – Síntese dos parâmetros da UQE 2312, necessários à aplicação do teste de *Laplace*.

UQE 2312		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum r_i$ (Km)	3.154.800		
T (Km)	220.353	0,89	1,65
α	0,10		
n_f	26		

Uma vez que $|Z_0| = 0,89 < Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,65$, não se rejeita a hipótese nula para um nível de significância de 5%, ou seja, conclui-se que se está perante um PPH com taxa de falhas constante. Uma vez que o valor de Z_0 é positivo, constata-se que a taxa de falhas prenuncia um ligeiro crescimento.

De realçar que na prática, uma automotora com este tipo de taxa de falhas não beneficia com a substituição preventiva dos seus bens reparáveis. Nesse sentido, Dias *et al.* (1999) afirma mesmo que pelo facto de um bem reparável se comportar como um PPH não significa que os bens reparáveis que o constituem apresentem uma função de risco constante. Em termos de manutenção, esta questão é fulcral visto que apenas os bens reparáveis com função de risco crescente devem ser substituídos preventivamente.

Para uma melhor interpretação do teste de *Laplace*, apresenta-se na Figura 4.8 a análise gráfica da UQE 2312.

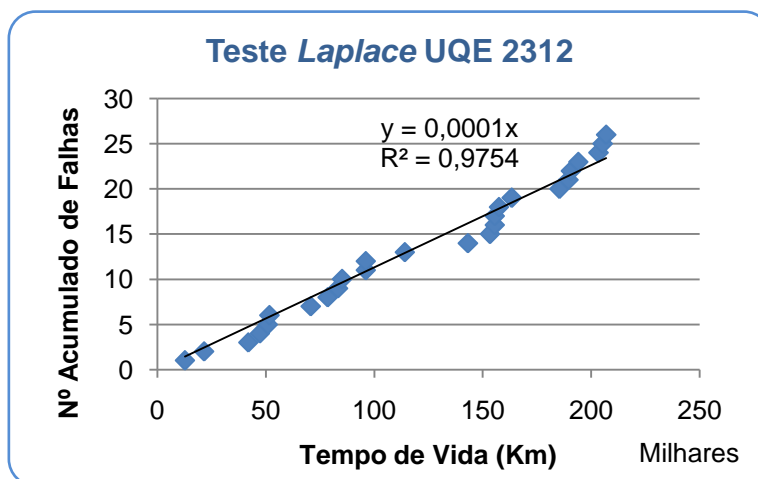


Figura 4.8 – Representação gráfica do teste de *Laplace* para a UQE 2312.

Por observação da Figura 4.8, pode-se desde logo verificar que é possível ajustar uma recta ao conjunto de pontos apresentados, comprovando-se assim a presença de um PPH. Com base no coeficiente de determinação R^2 , pode inclusive afirmar-se que se está perante um bom ajustamento, onde este explica cerca de 97,5% da variação, apresentando um erro de 2,5%.

Tal como visto anteriormente, o cálculo do MTBF e MTBF mínimo garantido seguem uma metodologia diferente nos casos em que as automotoras apresentam taxa de falhas constante. Desta forma, com recurso às Equações 2.1 e 2.2, obtêm-se os valores de MTBF e MTBF mínimo garantido apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2312.

UQE 2312					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	220.353	8.475	α	0,10	6.512
n_f	26		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	67,67	

De acordo com o limite inferior do intervalo de confiança determinado, pode-se aferir que a UQE 2312 apresenta em 95% dos casos um MTBF mínimo garantido superior a 6.512 Km.

De referir que as tabelas homólogas à Tabela 4.3 e 4.4 encontram-se no Apêndice A1 e A3, respectivamente. Por sua vez, as análises gráficas que complementam os testes de *Laplace* das restantes automotoras que constituem a frota encontram-se no Apêndice A2.

Porém, é possível observar na Tabela 4.5 um resumo dos indicadores de desempenho para todas as automotoras da frota S2300, nomeadamente o número de falhas, o valor da estatística de teste, a tendência da taxa de falhas, o MTBF e o MTBF mínimo garantido. Nesta, verifica-se a existência de alguns padrões nos resultados obtidos, isto é, todas as automotoras com taxa de falhas decrescente, à excepção da UQE 2317, 2326 e 2329, regressaram da R2 para serviço comercial imediatamente antes do início dos ensaios, pelo que a justificação para o resultado do teste de *Laplace* é, assim, igual à situação da UQE 2303.

No caso da UQE 2326, esta encontra-se em situação semelhante, no sentido em que também esteve imobilizada por um determinado período de tempo, não por motivos da R2 mas sim pelo facto de ter estado sem serviço comercial atribuído.

Por sua vez, as UQE 2317 e 2329 foram as únicas que não permaneceram imobilizadas, pelo que as razões anteriores não se aplicam neste caso. Assim, julga-se que a razão que mais contribuiu para que a UQE 2317 apresentasse uma taxa de falhas decrescente, seja o facto de esta ter sido alvo de inúmeras avarias no LRU *Gate Unit*, num relativo curto período de tempo durante a fase inicial do ensaio. Por sua vez, a elevada incidência de falhas em bens diversos num curto período de tempo caracteriza o resultado aferido da UQE 2329.

De entre as automotoras que apresentam uma taxa de falhas constante, algumas apresentam uma tendência para um notório decréscimo¹⁰ da mesma, nomeadamente a UQE 2320, 2321, 2337 e 2338, situação justificada pelo facto de terem sido alvo de R2 imediatamente antes do início do ensaio, exceptuando a UQE 2321. No caso desta última, não se conhece uma razão minimamente plausível que justifique o valor observado.

Por sua vez, as automotoras que apresentam uma forte tendência para um crescimento¹⁰ da taxa de falhas, nomeadamente a UQE 2306, 2309, 2313, 2318, 2319 e 2342 podem ser justificadas pelo facto de ter ocorrido diversas falhas anormais no LRU *Gate Unit*, exceptuando a UQE 2309, num reduzido período de tempo, o que certamente, terá contribuído para o resultado do teste. No caso da UQE 2309, julga-se não existir uma razão plausível que explique o sucedido.

Tendo em conta todos estes padrões, importa mencionar que os MTBF anteriormente calculados referem-se às falhas que representam ocorrências e que por sua vez não provocam a imobilização das automotoras, sendo as mesmas reportadas para posterior intervenção.

¹⁰ Admitindo os casos em que $|Z_0|$ encontra-se fora do intervalo de confiança de 84% ($\alpha = 16\%$), isto é, para valores inferiores ou superiores a $|Z_{\frac{\alpha}{2}}| = 1$.

Tabela 4.5 – Resumo dos indicadores de desempenho da frota de automotoras.

UQE	n_f	Z_0	Taxa de Falhas		MTBF (Km)	MTBF mínimo garantido (Km)
			Decrescente	Constante		
2301	34	-2,81	X		10.821	7.226
2302	27	0,37		X	9.746	7.650
2303	14	-2,64	X		22.694	12.096
2304	33	-0,88		X	7.904	6.346
2305	25	0,53		X	9.795	7.617
2306	24	1,13		X	11.967	9.259
2307	15	0,82		X	18.002	13.038
2308	43	0,96		X	5.902	4.868
2309	40	1,47		X	6.560	5.373
2310	35	-0,81		X	5.871	4.744
2311	41	-0,70		X	5.708	4.686
2312	26	0,89		X	8.475	6.622
2313	22	1,48		X	12.702	9.719
2314	27	-0,78		X	9.556	7.501
2315	38	-0,08		X	6.825	5.562
2316	26	-0,04		X	9.871	7.713
2317	42	-2,33	X		7.011	3.821
2318	33	1,51		X	7.886	6.332
2319	23	1,30		X	12.138	9.341
2320	41	-1,23		X	5.441	4.467
2321	19	-1,20		X	13.571	10.179
2322	21	-0,26		X	11.451	8.708
2323	14	-0,83		X	19.381	13.883
2324	27	0,23		X	7.743	6.078
2325	26	-0,04		X	10.044	7.848
2326	17	-1,88	X		3.177	1.795
2327	23	-0,99		X	11.769	9.057
2328	38	-0,41		X	6.915	5.635
2329	23	-2,57	X		14.213	8.712
2330	30	-0,51		X	9.427	7.490
2331	32	0,40		X	8.447	6.760
2332	23	-1,69	X		9.934	6.090
2333	24	-0,70		X	10.728	8.300
2334	26	0,04		X	8.233	6.433
2335	23	-0,84		X	7.951	6.119
2336	17	-2,33	X		8.812	6.791
2337	14	-1,62		X	12.209	8.746
2338	25	-1,56		X	4.918	3.825
2339	13	-0,65		X	11.379	8.052
2340	13	0,16		X	16.315	11.546
2341	15	-2,55	X		16.698	8.900
2342	24	1,16		X	4.546	3.517

Observando ainda a Tabela 4.5, é possível comprovar que das 42 automotoras que constituem a frota, 34 apresentam uma taxa de falhas constante, pelo que se pode afirmar de forma global, que a frota segue um PPH. O resultado obtido a partir do teste de *Laplace*, representado na Tabela 4.6, comprova esta mesma afirmação, assim como a respectiva representação gráfica apresentada através da Figura 4.9.

Tabela 4.6 – Síntese dos parâmetros da Frota, necessários à aplicação do teste de *Laplace*.

Frota UQE S2300		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	5.205.707.600		
T (Km)	9.477.785	0,13	1,65
α	0,10		
n_f	1096		

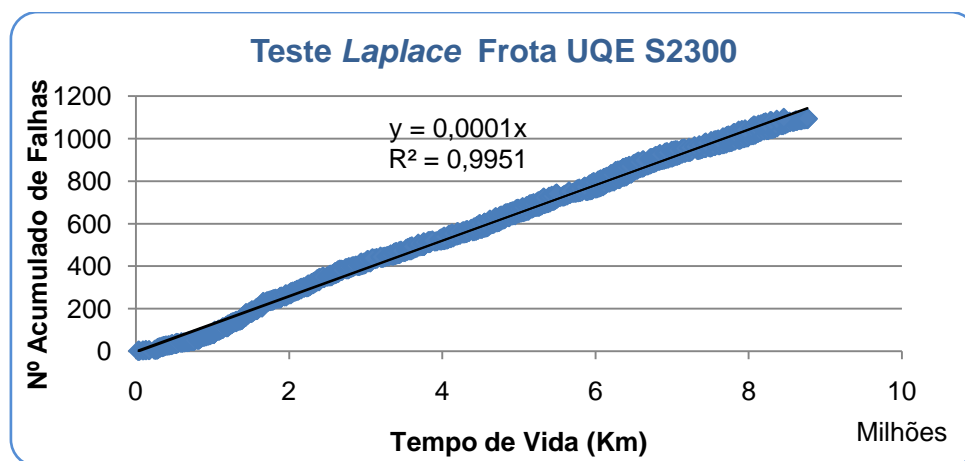


Figura 4.9 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da Frota de UQE S2300.

De referir que a representação gráfica do teste de *Laplace* apresentada na Figura 4.9 foi obtida por recurso às ocorrências de falhas em cada UQE que compõe a frota, encontrando-se estas representadas em forma gráfica no Apêndice A4.

Com base na totalidade de Km percorridos pelas 42 UQE, assim como na totalidade de falhas registadas, é possível afirmar que o comportamento médio das UQE S2300 traduz-se num MTBF médio de 8.646 Km.

4.3.2. Análise das Falhas da Frota – Identificação dos Bens Críticos

Uma vez analisado o comportamento individual de todas as automotoras, interessa agora identificar num contexto global da frota, os bens reparáveis mais significativos, desde o mais abrangente ao mais pormenorizado.

Tendo em conta a vasta experiência acumulada dos engenheiros e técnicos no terreno, foi inicialmente fornecida a informação de que todas as automotoras da frota partilhavam de problemas críticos transversais em alguns LRU, nomeadamente nos LRU *Gate Unit*, Comando de Limpa Vidros e Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico. Com o intuito de comprovar estas suspeitas, decidiu-se recorrer a uma ferramenta amplamente utilizada na análise estatística da fiabilidade de sistemas, o diagrama de Pareto. Segundo Basu (2004), através desta representação gráfica é possível identificar de forma prioritária os bens responsáveis pela ocorrência dos problemas, tratando-se estes neste caso de falhas. Em termos quantificáveis, o autor afirma que este princípio pode ser entendido como 80% das consequências advirem de 20% das causas.

A análise de Pareto foi efectuada de forma sequencial, começando-se por identificar os bens críticos mais abrangentes – Grupos de sistemas. De entre estes, procedeu-se à identificação dos Sistemas, que por sua vez foram alvo de análise a fim de conhecer os Subsistemas mais significativos responsáveis pelas falhas. Conhecidos esses Subsistemas, foi possível identificar em quais deles se encontravam os LRU críticos. De realçar que se procedeu à referida abordagem pois deste modo foi possível limitar a análise a apenas os bens relevantes para a análise, tornando mais fácil a sua identificação.

De forma a conhecer o diagrama de Pareto representativo dos grupos de sistemas, procedeu-se, portanto, à recolha dos dados presentes na Tabela 4.7. Na primeira e segunda coluna encontram-se discriminados os grupos de sistemas onde se verificou a falha e respectivo código de identificação. Na terceira, quarta e quinta coluna, encontram-se representados, respectivamente, os valores da frequência absoluta, frequência relativa e frequência relativa acumulada.

Tabela 4.7 – Número de falhas ocorridas por grupo de sistemas e respectivo percentual acumulado.

Grupo de sistemas (GS)	Código	Nº Falhas	% Falha GS	Percentual Acumulado
Circuito de Tracção	CT	254	23,18	23,18
Caixa, Tracção e Choque	CTC	239	21,81	44,98
Ar Condicionado	CLS	225	20,53	65,51
Comando e Controlo	CEC	91	8,30	73,81
Produção de Ar e Freio	PAF	77	7,03	80,84
Conversor Auxiliar	CA	50	4,56	85,40
Serviço de Informação aos Passageiros	SIP	50	4,56	89,96
Segurança da Circulação	SCI	50	4,56	94,53
Captação e Transformação de Energia	CTE	41	3,74	98,27
Rolamento e Suspensão	RES	19	1,73	100
TOTAL		1096		

Da observação da Tabela 4.7, conclui-se que os grupos de sistemas que mais significativamente contribuem para as falhas registadas são o Circuito de Tracção, Caixa Tracção e Choque e Ar Condicionado, com 718 falhas (254+239+225), representando dessa forma 65,51% da totalidade das 1096 falhas. Esta situação pode ser facilmente percebida pelo diagrama de Pareto representado na Figura 4.10.

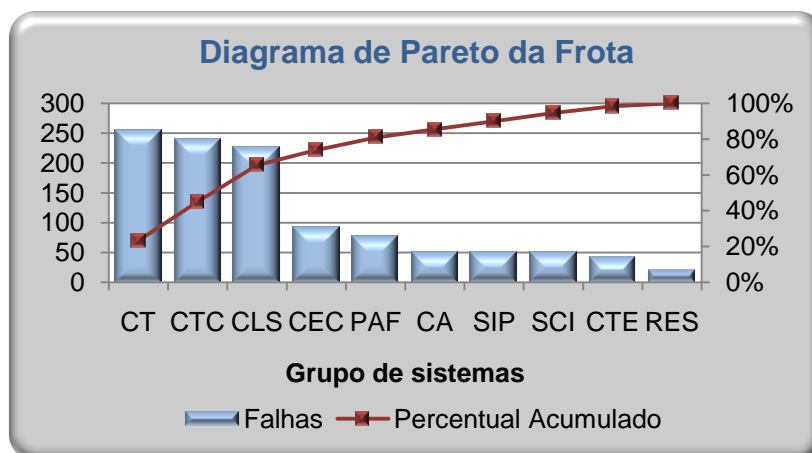


Figura 4.10 – Diagrama de Pareto dos grupos de sistemas da frota.

Tendo agora em atenção apenas as 718 falhas correspondentes aos 3 grupos de sistemas mais críticos, procedeu-se novamente à aplicação do Princípio de Pareto, de forma a conhecer os sistemas mais críticos dentro destes.

Por sua vez, efectuando-se um raciocínio análogo para os subsistemas e LRU, alcançou-se os resultados demonstrados na Tabela 4.8, referentes aos LRU. As tabelas intermédias análogas à Tabela 4.8, correspondentes às falhas registadas nos sistemas e subsistemas, assim como os respectivos diagramas de Pareto, encontram-se no Apêndice A4.

Por observação da Tabela 4.8, comprova-se o que já se suspeitava inicialmente, isto é, os LRU *Gate Unit*¹¹, Comando de Limpa Vidros e Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico são efectivamente componentes críticos, representando 76,84% do total de 380 falhas. Além destes, julga-se que o LRU Carta de Entradas/Saídas (E/S) apresenta igualmente um nível de criticidade merecedor de atenção, contribuindo desta forma para a explicação dos cerca de 83%. Esta situação é facilmente visível no diagrama de Pareto representado na Figura 4.11.

Tendo em conta a natureza das diversas falhas registadas na fase inicial do estudo (análise efectuada anteriormente no Subcapítulo 4.3.1), nomeadamente das UQE 2309 e 2321, pode verificar-se que estas ocorrem na sua grande maioria nos cinco LRU identificados como sendo de maior nível de criticidade. Este facto justifica, portanto, a tendência para uma taxa de falhas

¹¹Ainda que apresentem dois códigos distintos, estes LRU são exactamente iguais em termos de especificações técnicas, divergindo apenas o sistema de funcionamento na automotora onde estes se encontram alocados.

decrecente apresentada por estas UQE, que até esta fase de análise do projecto julgava-se não terem justificação aparente.

Por sua vez, esta justificação serve de igual modo para os restantes casos em que as UQE apresentam uma taxa de falhas decrescente ou uma franca tendência para esse tipo de taxa.

Tabela 4.8 – Número de falhas ocorridas por LRU e respectivo percentual acumulado.

LRU	Código	Nº Falhas	% Falha LRU	Percentual Acumulado
<i>Gate Unit</i>	CTR0302	133	35,00	35,00
<i>Gate Unit</i>	CTR0502	62	16,32	51,32
Comando	CDC0403	56	14,74	66,05
Tubagem e flexíveis do circuito frigorífico	CLS23003001	41	10,79	76,84
Carta de Entradas/Saídas (E/S)	CLS23000208	23	6,05	82,89
GTO A1, A2, A11 e A12	CTR0301	15	3,95	86,84
Cartas 3A1/3A4	CLS23000207	10	2,63	89,47
Motor	CDC0406	9	2,37	91,84
GTO A3, A4, A5, A13, A14 e A15	CTR0501	6	1,58	93,42
Transdutores de tensão U11, U12, U13 e U14	CTR0305	4	1,05	94,47
Carro	CDC0402	4	1,05	95,53
Carta Z1 de alimentação da carta de relés	CLS23000206	4	1,05	96,58
Sonda de temperatura do GTO	CTR0508	3	0,79	97,37
Sonda de temperatura do GTO	CTR0308	2	0,53	97,89
Carta de controlo e comando do ar condicionado A1	CLS23000201	2	0,53	98,42
Cablagem solta/partida/queimada	CTR0306	1	0,26	98,68
Transdutores de corrente U5 a U10	CTR0504	1	0,26	98,95
Condensadores do circuito intermédio C1 a C22, C31 a C48	CTR0303	1	0,26	99,21
Cablagem solta/partida	CTR0505	1	0,26	99,47
Ficha do cabo de fibra óptica	CTR0507	1	0,26	99,74
Escovas de limpeza das portas	CDC0405	1	0,26	100
TOTAL		380		

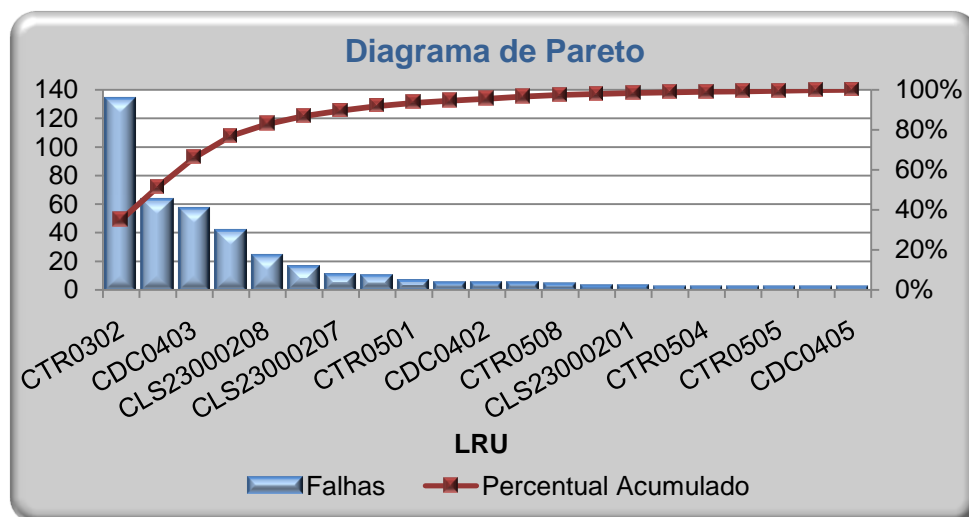


Figura 4.11 – Diagrama de Pareto dos LRU pertencentes aos subsistemas críticos da frota.

Uma vez conhecidos os bens críticos, está-se em condições de avançar para o estudo do incremento provocado no MTBF médio actual da frota, caso sejam atenuados ou se possível eliminados os problemas associados aos bens críticos, reduzindo deste modo o índice de falhas oriundas nestes bens.

Capítulo 5

Cenário Proposto: Estudo do novo MTBF Médio da Frota

1. Introdução
2. Descrição dos Bens Críticos
3. Pressupostos Considerados
4. Cálculo do MTBF Médio da Frota
5. Disponibilidade Operacional da Frota

5.1. Introdução

Identificados os bens críticos, pretende-se saber qual o benefício obtido em termos de MTBF médio da frota, caso se atenuem ou idealmente eliminem as falhas ocorridas nestes bens, através da implementação da solução prática mais adequada. De forma a possuir uma melhor sensibilidade para a formulação de uma proposta de solução, julga-se ser importante conhecer minimamente os bens reparáveis em causa, sendo por isso apresentada uma breve descrição das principais funções e características dos mesmos.

5.2. Descrição dos Bens Críticos

Antes de avançar para o estudo do novo MTBF médio da frota, convém conhecer em pormenor cada um dos bens críticos, possibilitando deste modo uma melhor percepção do tipo de bem que estão aqui em causa. Assim, apresenta-se de seguida uma breve descrição dos mesmos, tanto em termos das suas características técnicas quanto das suas principais funções.

Gates Unit (Rectificador – CTR0302 e Ondulador – CTR0502)

O LRU *Gate Unit* é a unidade de comando e controlo dos disparos dos tirístores *Gate Turn Off* (GTO). Sendo também designada por Módulo A11, posição esquemática funcional, esta unidade apresenta deste modo a função de gerar impulsos no tiristor GTO, fazendo com que o seu circuito seja aberto ou fechado. Por outras palavras funciona como um simples interruptor que liga ou desliga o GTO através da imposição de impulsos.

A *Gate Unit* é constituída por três módulos, nomeadamente os módulos A1 e A2 de alta tensão e o módulo A3 de duplo comando, tal como representado na Figura 5.1.



Figura 5.1 – LRU *Gate Unit* utilizada nas UQE S2300 (vista frontal).

Ainda que o LRU GTO não seja alvo da presente análise, julga-se ser importante descrevê-lo resumidamente visto estar directamente relacionado com o LRU *Gate Unit* em termos funcionais (encontra-se fixada frontalmente ao mesmo, como representado a vermelho na Figura 5.2).

O GTO é um dispositivo semiconductor de potência bipolar ideal para aplicações electrónicas de alta potência, visto ser capaz de suportar tensões e correntes na ordem dos kV e kA.

Na prática, o GTO detém a função de alimentar os motores de tracção trifásicos, passando à condução quando aplicado um impulso positivo de corrente; por outro lado, aplicando um impulso negativo de corrente consegue-se forçar que este passe ao corte, sendo esta uma característica fundamental deste dispositivo face a outros.

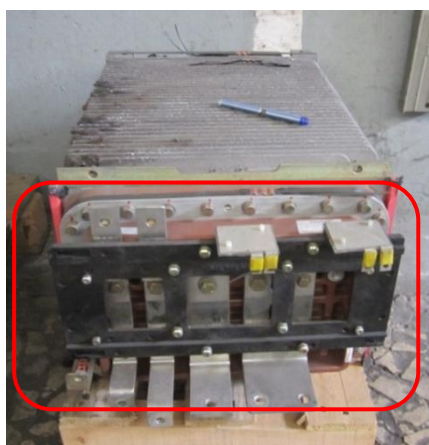


Figura 5.2 – LRU GTO utilizado nas UQE S2300 (vista frontal).

A nível funcional, o módulo de duplo comando A3 é alimentado por uma tensão contínua de 72V, recebendo da UCT os sinais de aviso ON (Ligado) e OFF (Desligado), sob a forma de sinais em corrente. Cada um destes sinais é convertido numa sequência de impulsos, que servirá tanto de alimentação de energia aos módulos A1 e A2, como à transmissão do próprio sinal ON/OFF a estes módulos. Por sua vez, estes módulos encontram-se ligados ao cátodo

(eléctrodo negativo) do GTO. Na situação de ON é dada uma ordem de disparo e em OFF uma ordem de corte ao GTO.

Através da sinalização de 4 LED's (*Light Emitting Diode*), situados na parte inferior de cada módulo de alta potência, é obtido um diagnóstico em tempo real, consoante a cor apresentada:

- LED Verde (1) – indicação de tensão de extinção (corte) aplicada; circuito de controlo da *Gate Unit* interrompido;
- LED Amarelo (1) – indicação de tensão de disparo em circuito aberto; circuito de controlo da *Gate Unit* interrompido;
- LED Vermelho (2) – indicação do correcto funcionamento do circuito de controlo da *Gate Unit*; flui corrente de ignição (disparo) do GTO.

Sendo correcto o funcionamento da *Gate Unit*, verifica-se a alternância da indicação dos LED's verdes entre os módulos A1 e A2 a um ritmo de 1 Hertz, assim como os 2 LED's vermelhos permanentemente acesos, sendo que a cada instante, o LED vermelho do módulo com o LED verde apagado, apresenta um brilho mais intenso.

Com o intuito de obter uma melhor percepção do local onde as *Gates Unit* se encontram na UQE, apresenta-se na Figura 5.3 um desenho esquemático da posição física das 22 *Gates Unit* repartidas pelos 2 subsistemas críticos, nomeadamente o Rectificador e Ondulador, assim como pelo subsistema Curto-circuitador, este de total irrelevância para a presente análise.

Por observação da Figura 5.3, é possível comprovar a existência de 20 *Gates Unit* dispostas por 4 grupos de tração exactamente iguais em termos funcionais, 2 por cada unidade motora. Cada um destes grupos alberga 5 *Gates Unit*, das quais 2 dizem respeito ao Rectificador (Fases eléctricas U e V), e 3 ao Ondulador (Fases eléctricas R, S e T), responsáveis pela alimentação dos 2 motores assíncronos dispostos em paralelo.

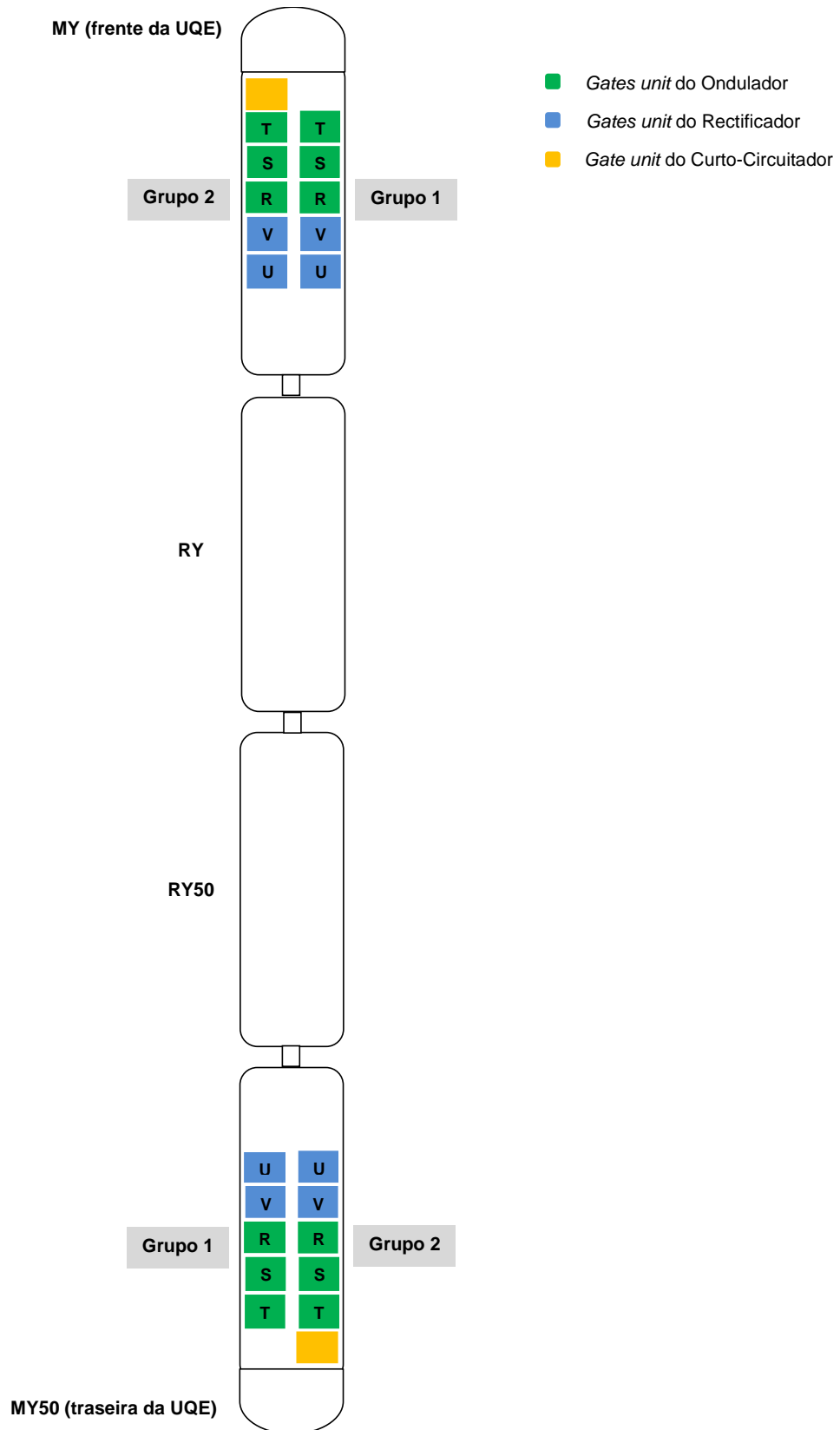


Figura 5.3 – Posição física dos LRU Gate Unit utilizadas nas UQE S2300 (vista de cima).

Comando de Limpa Vidros (CDC0403)

O LRU Comando de Limpa Vidros, representado na Figura 5.4, encontra-se localizado no painel da cabine de condução, sendo facilmente controlável pelo maquinista. Este apresenta como função o accionamento eléctrico do funcionamento do motor do sistema de pára-brisas, que possibilitará uma limpeza do vidro da carruagem motora obtendo-se conseqüentemente uma melhor visibilidade. Sendo um bem reparável, este contém diversos componentes electrónicos (na sua grande maioria transístores e resistências) integrados num pequeno circuito eléctrico, sendo que a maioria das avarias é atribuída a transístores queimados.



Figura 5.4 – LRU Comando de Limpa Vidros utilizado nas UQE S2300 (vista lateral e frontal).

Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico (CLS23003001)

Situado no tecto da zona central de cada salão de passageiros da UQE, o LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico, representado na Figura 5.5, é um dos diversos bens reparáveis que constituem o sistema de climatização, apresentando o modo de refrigeração (representado a verde) e de aquecimento (representado a vermelho).

Servindo de elo de ligação entre o reservatório de gás (de capacidade de 13 Kg) e o sistema de distribuição de calor/frio em 12 locais dispersos por cada salão (zona inferior dos bancos), este LRU pode comprometer parcialmente o funcionamento do sistema de climatização aquando de uma avaria. Por causas maioritariamente vibracionais, sabe-se que a maioria das avarias registadas neste LRU ocorre no processo de refrigeração, especificamente nos tubos de alta pressão que acabam por romper devido à elevada utilização durante os meses mais quentes do ano.

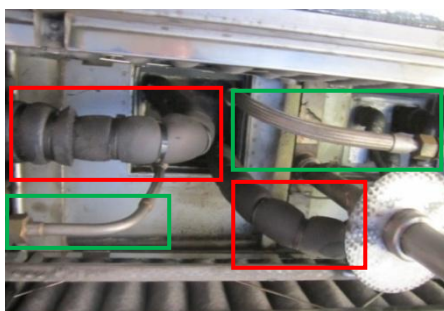


Figura 5.5 – LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico utilizado nas UQE S2300 (vista de baixo).

Carta de Entradas/Saídas – E/S (CLS23000208)

Sendo este LRU um bem reparável, apresenta como única função o processamento da informação digital recebida de outros sistemas, emitindo ordens de activação ou desactivação do sistema de climatização. À semelhança do LRU Comando de Limpa Vidros, contém diversos pequenos componentes electrónicos integrados em circuito.

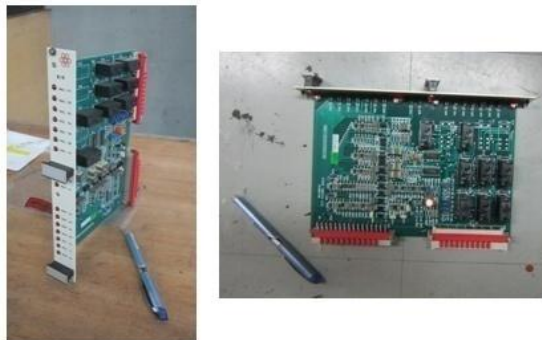


Figura 5.6 – LRU Cartas de Entradas/Saídas – E/S utilizado nas UQE S2300 (vista frontal e lateral).

Juntamente com as restantes cartas de climatização, esta carta encontra-se inserida num painel metálico denominado *RACK* (Figura 5.7), situado no exterior da caixa da UQE na zona central inferior da mesma.



Figura 5.7 – *RACK* do LRU Carta de Entradas e Saídas – E/S (vista frontal).

5.3. Pressupostos Considerados

Conhecidas as principais características dos bens críticos, importa agora conhecer as distribuições estatísticas que melhor caracterizam o comportamento das suas falhas, assim como a solução prática que melhor se adequa, possibilitando uma estimativa do novo MTBF médio da frota.

Gates Unit (Rectificador – CTR0302 e Ondulador – CTR0502)

Tendo em conta as características técnicas e financeiras que este LRU envolve (bem reparável com elevado custo de aquisição), decidiu proceder-se ao desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva. Com base nos tempos de vida do LRU, decidiu-se recorrer à distribuição de *Weibull* para a modelação dos mesmos, visto ser esta distribuição a mais indicada para o estudo de tempos de vida de bens. Pela experiência dos engenheiros e técnicos no terreno, chegou-se à conclusão que actualmente este LRU apresenta uma probabilidade de falha (p) na ordem dos 40% pelo que se pretende diminuir a mesma para 15%.

Comando de Limpa Vidros (CDC0403) e Cartas de Entradas/Saídas – E/S (CLS23000208)

No caso destes dois LRU, chegou-se à conclusão juntamente com os engenheiros da EMEF de que a melhor solução poderia passar pela substituição dos mesmos por novos (pois estes LRU encontram-se actualmente demasiado envelhecidos), em vez de continuar a incorrer na actual política de reparação que se julga estar a trazer poucos benefícios.

Com o intuito de encontrar um valor representativo da nova taxa de falhas de cada um dos LRU (admitindo portanto que estes são substituídos por novos), tentou-se obter essa informação junto de um fabricante dos LRU em questão. Não tendo sido possível, recorreu-se a um relatório científico desenvolvido por Bollen (1993) sobre a revisão da literatura dos valores típicos de fiabilidade de LRU electrónicos semelhantes aos existentes em estudo, tendo-se considerado as taxas de falha apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Taxa de falhas dos LRU Cartas de Entradas/Saídas e Comando de Limpa Vidros.

LRU	MTTF (Anos)	Taxa de Falhas (λ)	
Cartas de Entradas/Saídas	7	0,143 falhas/Ano	0,64 falhas/milhão Km
Comando de Limpa Vidros	10	0,1 falhas/Ano	0,45 falhas/milhão Km

Sendo estes LRU bens reparáveis electrónicos, O'Connor (1991) afirma que estes apresentam uma ocorrência aleatória de falhas, razão pela qual este tipo de bens são vulgarmente modelados de acordo com a distribuição Exponencial Negativa. De realçar que as taxas de falha apresentadas não levam em consideração as eventuais falhas que possam ocorrer durante o período infantil do ciclo de vida dos LRU. No caso do LRU Comando de Limpa Vidros considerou-se analisar a situação num cenário desfavorável, visto que segundo o autor o MTTF pode variar entre 10 a 30 anos.

Sabendo que a frota de UQE efectua em termos médios anuais 4.500.000 Km, decidiu-se proceder à conversão da unidade das taxas de falha com o intuito de uniformizar os dados, visto ser esta a unidade adoptada para efeitos de análise.

Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico (CLS23003001)

Relativamente a este LRU sabe-se que o mesmo foi sujeito a sucessivas reengenharias do seu processo durante os anos de 2010 e 2011 (Figura 5.8) visto comprovar-se que a reparação após a avaria não trazia grandes benefícios em termos de tempo de vida útil.



Figura 5.8 – Sucessivas reengenharias do LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico (vista frontal).

Deste modo, com a actual reengenharia (situação 3), julga-se ter solucionado o problema. Analisando a evolução do histórico de falhas comprova-se efectivamente um decréscimo gradual destas ao longo do período entre 2010 e 2012. Nesse sentido assumiu-se não ser necessário modelar este LRU de acordo com uma distribuição de probabilidade admitindo-se que actualmente a sua taxa de falhas é nula.

Fazendo um balanço dos pressupostos considerados para o cenário proposto, apresenta-se no Quadro 5.1 um resumo dos mesmos.

LRU	Tipo de Solução	Descrição da Solução Prática	Distribuição de Probabilidade	Valores a considerar
<i>Gates Unit</i>	Preventiva	Monitorização visual e de parâmetros técnicos	<i>Weibull</i>	15%
Comando de Limpa Vidros	Correctiva	Substituição por novo	Exp. Negativa	0,45 falhas/milhão Km
Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico	Correctiva	Reengenharia do processo	–	0
Carta de Entradas/Saídas	Correctiva	Substituição por novo	Exp. Negativa	0,64 falhas/milhão Km

Quadro 5.1 – Resumo dos pressupostos considerados para o cenário proposto.

5.4. Cálculo do MTBF Médio da Frota

De forma a conhecer o MTBF médio da frota é necessário quantificar o decréscimo esperado de falhas nos LRU críticos após implementadas as soluções práticas sugeridas. Deste modo começa-se por apresentar o plano de manutenção preventiva proposto aos LRU *Gates Unit*.

Gates Unit (Rectificador – CTR0302 e Ondulador – CTR0502)

De forma a conceber um plano de manutenção preventiva foi necessário começar por efectuar uma análise suportada nos tempos de vida do LRU. Para isso utilizou-se o *software Statistica v8.0*, visto ser uma ferramenta estatística de elevada robustez no tratamento dos dados e respectiva obtenção de resultados, assim como pelo facto de apresentar uma interface simples e de fácil acesso e compreensão.

Antes de mais, julga-se ser importante mencionar que para uma correcta modelação dos dados segundo a literatura apresentada anteriormente no Subcapítulo 3.2, o tempo correspondente à primeira falha de cada *Gate Unit* deveria ser excluído pelo facto de ser censurado. Apesar disso, tal não foi feito assumindo-se que esses tempos são não censurados, visto estar-se a lidar com amostras de falhas de dimensão reduzida.

Para efeito prático da modelação dos dados, decidiu-se excluir os tempos de vida correspondentes às 20 *Gates Unit* inferiores a 100 dias¹² e superiores a 1825 dias (5 anos). Tendo em conta que este LRU é um bem reparável, poderia-se de imediato ser levado a pensar que o facto das falhas apresentarem um tempo de vida inferior a 100 dias (em muitos dos casos de apenas alguns dias) seria justificado pela eventual reparação imperfeita efectuada pelos reparadores SIEMENS e ALSTOM, o que não corresponde de todo à verdade. Isto porque após a entrada em contacto com uma das reparadoras, nomeadamente a SIEMENS, foi garantido que estes LRU são submetidos a diversos testes e ensaios segundo elevados níveis de qualidade, podendo inclusive após a reparação ser considerados “*Same as New*”. Ainda que tenha sido impossível obter esclarecimentos junto da ALSTOM face a este assunto, assume-se que a mesma se encontra a aplicar esta filosofia de igual modo.

Junto da SIEMENS foi possível aferir, com base na sua longa experiência nestes LRU, duas justificações que muito provavelmente comprovam a maioria das situações reportadas desta natureza, nomeadamente:

- Ocorrência de micro fissuras nas soldaduras dos circuitos electrónicos integrados dos módulos A1, A2 e A3 provocadas por círculos térmicos e/ou vibracionais, facilmente

¹² Assumiu-se este valor com base numa simples análise de sensibilidade aos tempos de vida, isto porque apesar do contacto com o próprio fabricante e reparador SIEMENS, foi impossível obter um valor visto que este LRU apresenta uma ocorrência de falhas considerada aleatória.

imperceptíveis nos testes e ensaios efectuados (estas avarias são classificadas pelo reparador como avarias intermitentes);

- Condições de serviço a que as *Gate Unit* são sujeitas (forma como o maquinista impõe tracção em função de condições diversas – quantidade de carga transportada pela UQE, inclinação do terreno, etc);

Por sua vez, excluíram-se os intervalos superiores a 1825 dias por se julgar estar perante a inexistência de registos, visto existirem intervalos bastante extensos isentos de falhas. No Apêndice B1 encontra-se representada uma tabela com todos os tempos de vida não censurados, encontrando-se claramente identificados os *outliers* que foram excluídos. De mencionar que nesta fase do estudo utilizou-se a base temporal diária como unidade de medida pois este tipo de LRU, sendo do tipo electrónico, apresenta vulgarmente o seu tempo médio de vida dado em horas ou dias.

Tendo em conta a metodologia teórica apresentada no Subcapítulo 3.3.2, procedeu-se portanto à utilização dos parâmetros de escala e forma para o cálculo do intervalo de tempo de manutenção preventiva, tendo-se obtido as estimativas apresentadas na Tabela 5.2. Pode facilmente observar-se que os parâmetros de forma, *shape*, e escala, *scale*, assumem respectivamente, um valor de 1,89 e 710,7, aproximadamente.

Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros de forma e escala estimados para o LRU *Gate Unit*.

ML Estimates for 2-Parameter Weibull Distribution (teste)					
Tempo Vida; Censoring: Dados Censurados (1,0) N=278 Censored:123					
Param.	Param. Value	Asympt. Std.Err.	-95,0% LCL	+95,0% UCL	Covariance Shap/Scl
Location	0,0000				
Shape	1,8892	0,10578	1,6928	2,1083	
Scale	710,7294	30,22684	653,8879	772,5122	-0,076375

Uma vez que estes valores são estimativas, encontram-se associados a um intervalo de confiança. Dessa forma, e pelo facto de o histórico de falhas ser relativamente curto, assim como pelo registo de falhas deste LRU não ser completamente fidedigno, impossibilitando uma análise mais fiável, estas estimativas foram efectuadas admitindo-se um nível de significância de 10%. Por observação da Tabela 5.2, pode verificar-se que os valores estimados se encontram dentro do intervalo de confiança calculado, isto é, entre o limite inferior de controlo, *Low Control Limit* (LCL), e o limite superior, *Up Control Limit* (UCL).

Após conhecidos os valores estimados dos parâmetros, importa agora averiguar se estes se traduzem num bom ajustamento à distribuição de *Weibull*, ou seja, pretende-se confirmar se esta distribuição é efectivamente a distribuição que melhor traduz a amostra dos tempos de vida observados. Com recurso às funções do *software* obteve-se portanto o gráfico representativo do modelo de ajustamento, apresentado pela Figura 5.9.

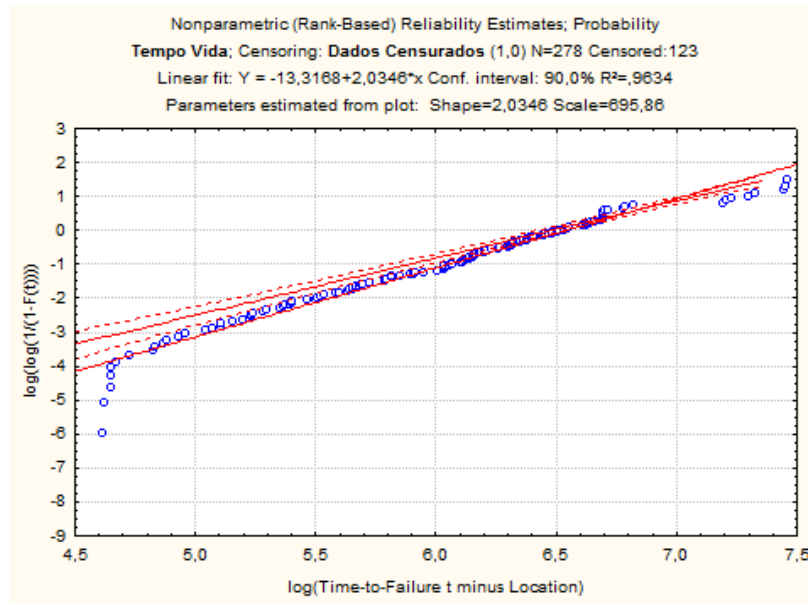


Figura 5.9 – Ajustamento dos tempos de vida do LRU *Gate Unit* através de método não paramétrico.

De forma a obter o intervalo de confiança apresentado na Figura 5.9., o *software Statistica* modela por defeito os dados de acordo com o MLE, obtendo-se desta forma uma das rectas, sendo que a outra surge da modelação dos dados por recurso à estimativa gráfica. Dito isto, verifica-se portanto um bom ajustamento dos dados excluindo algumas situações pontuais. A comprovar isto mesmo, estão os valores de forma e escala estimados pelo modelo não paramétrico, que apesar de diferentes, apresentam-se sensivelmente próximos dos valores estimados anteriormente. Desta forma está-se portanto em condições de calcular a periodicidade de manutenção preventiva.

Tendo em conta a probabilidade de falha de 40%, pretende-se reduzir este valor para 15%, ou por outras palavras, aumentar a fiabilidade de 60 para 85%. Considerando os valores dos parâmetros correspondentes ao LCL, situação mais favorável visto que abrange 95% dos casos, procedeu-se ao cálculo da periodicidade, W , tendo-se obtido o valor apresentado na Figura 5.10.

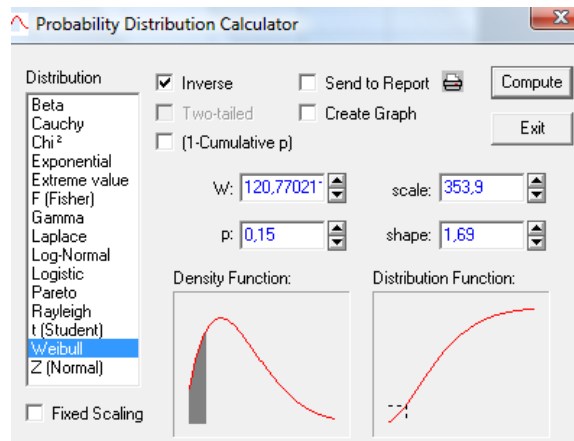


Figura 5.10 – Periodicidade de manutenção preventiva obtida para o LRU *Gate Unit*.

Da observação da Figura 5.10, conclui-se portanto que para uma Fiabilidade de 85%, garantida em 95% dos casos, aconselha-se uma intervenção de carácter preventivo ao LRU *Gate Unit* a cada 120 dias, aproximadamente (4 meses). Esta situação é comprovada pelo gráfico da função densidade de probabilidade apresentada na Figura 5.11 (gráfico à esquerda), assim como pelo gráfico da função de distribuição de probabilidade (gráfico à direita).

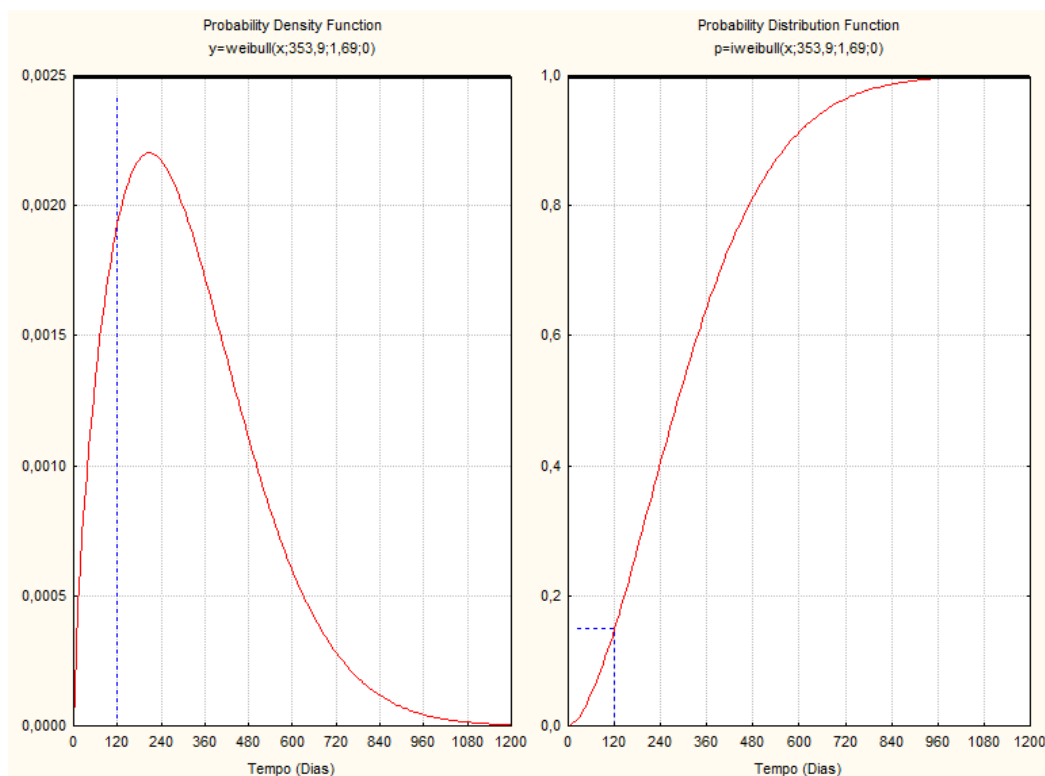


Figura 5.11 – Funções Densidade e Distribuição de probabilidade do LRU *Gate Unit*.

Adoptando esta periodicidade preventiva permite-se verificar um aumento na fiabilidade quer de cada UQE como da frota, conseqüentemente. Tendo em conta que cada UQE integra 4 grupos de tracção, munidos respectivamente de 5 *Gates Unit* dispostas em série, como representado na Figura 5.12, (sendo que o funcionamento do respectivo grupo fica de imediato comprometido aquando da avaria num dos seus 5 LRU), cada grupo apresenta uma fiabilidade de 0,44%, valor este obtido através da Equação 2.6.

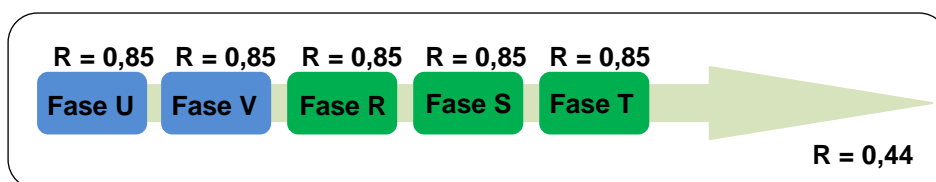


Figura 5.12 – Disposição em série dos LRU *Gates Unit*.

Sendo apenas necessário um único grupo para movimentar uma UQE, ainda que com várias limitações (velocidade máxima de 80Km/h, tempo de funcionamento máximo de 4 horas, inibição do processo de frenagem dinâmica e maior desgaste das rodas, etc), comprova-se que se está perante um sistema de redundância total (4 grupos dispostos em paralelo em termos

funcionais), como representado na Figura 5.13. Deste modo, cada UQE apresenta uma fiabilidade 90%, valor este obtido através da Equação 2.10.

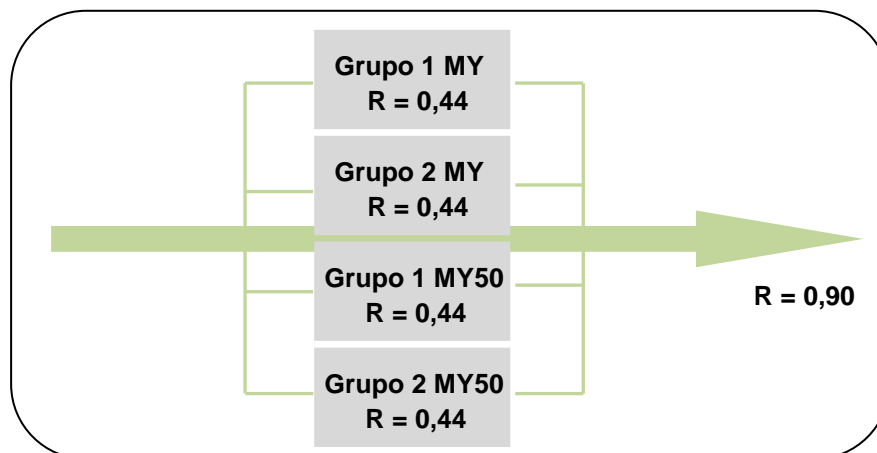


Figura 5.13 – Disposição em paralelo dos 4 grupos de tracção da UQE.

Por sua vez pode afirmar-se que a frota de UQE apresenta uma fiabilidade de 90%, sendo que a probabilidade de cada uma destas ficar imobilizada por motivos de falha neste LRU é de 10%.

Tendo em conta a periodicidade preventiva de 120 dias, ou seja, 42270 Km (considerando a média diária de 350 Km percorridos pela maioria das UQE nas linhas de Sintra e Azambuja), sugere-se que sejam adicionadas algumas instruções de trabalho referentes a este LRU às já existentes na V3. Isto porque sendo esta a visita que mais próxima está da periodicidade calculada, segundo o PMP (40.000 Km), permitirá reforçar a manutenção preventiva destes LRU.

Sugere-se portanto que se inclua nesta visita algumas tarefas de rastreio técnico rápido:

- ✓ Supervisão visual, pesquisando a existência de:
 - Sujidade em especial nas zonas isolantes e de contacto;
 - Vestígios de aquecimento excessivo em algum dos módulos;
 - Vestígios de descargas eléctricas;
- ✓ Execução de testes electrónicos para a medição de parâmetros diversos (Corrente de alimentação do LRU, entre outros parâmetros relevantes).

Além destas sugestões técnicas, julga-se ser igualmente importante informar os maquinistas de algumas recomendações para a boa prática de condução em função de condições diversas (quantidade de carga transportada, inclinação do terreno).

Colocado este plano de manutenção em prática estima-se que das 195 avarias registadas se consiga evitar que 166 avariem (correspondentes a 85% de fiabilidade) existindo 29 que efectivamente avariaram.

Comando de Limpa Vidros (CDC0403)

Tendo em conta a quilometragem actual da frota e o número de falhas neste LRU, sabe-se que o mesmo apresenta uma taxa média de 5,9 falhas por milhão de quilómetros percorridos, ou por outras palavras um MTTF de 169.246 Km (considerando a relação da Equação 2.3), como representado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Comando de Limpa Vidros.

Parâmetro	Cenário Actual	Cenário Proposto	Variação
λ (Falhas/Milhão Km)	5,9	0,45	
MTTF (Km)	169.246	2.222.222	
Σ Km Frota	9.477.785		
n_f	56	4	- 52

Considerando o cenário proposto, para uma taxa de 0,45 falhas por milhão de quilómetros percorridos, obtém-se um MTTF de 2.222.222 Km com a consequente redução de 52 falhas.

Carta de Entradas/Saídas – E/S (CLS23000208)

À semelhança do LRU anterior, as Cartas de Entradas/Saídas – E/S apresentam actualmente uma taxa média de 2,4 falhas por milhão de quilómetros percorridos, e por conseguinte um MTTF de 412.078 Km, como representado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Cartas de Entrada/Saídas – E/S.

Parâmetro	Cenário Actual	Cenário Proposto	Variação
λ (Falhas/Milhão Km)	2,4	0,64	
MTTF (Km)	412.078	1.555.556	
Σ Km Frota	9.477.785		
n_f	23	6	- 17

Neste caso, espera-se a ocorrência de uma falha após percorridos 1.555.556 Km, observando-se uma redução de 17 falhas face à situação actual.

Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico (CLS23003001)

Neste caso, o LRU apresenta actualmente uma taxa média de 4,3 falhas por milhão de quilómetros percorridos, e por conseguinte um MTTF de 231.165 Km, como representado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Cálculo do número de falhas esperadas para o LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico.

Parâmetro	Cenário Actual	Cenário Proposto	Variação
λ (Falhas/Milhão Km)	4,3	-	
MTTF (Km)	231.165	-	
Σ Km Frota	9.477.785		
n_f	41	0	- 41

Tendo em conta a evolução do histórico das falhas deste LRU, resultante da reengenharia do seu processo, assume-se portanto no cenário proposto a redução da totalidade das falhas registadas.

Uma vez quantificado o decréscimo esperado de falhas nos vários LRU críticos, é possível determinar o incremento no MTBF médio da frota, apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Incremento no MTBF médio da frota.

Parâmetro	Cenário Actual	Cenário Proposto	Variação	
			Numérica	%
n_f	1096	821	-275	-25,13
MTBF Médio Frota (Km)	8646	11.550	+2.904	+33,58

Por observação da Tabela 5.6, verifica-se portanto que da implementação do cenário proposto advém um aumento no MTBF médio da frota de aproximadamente 33,6%, mensuráveis em 2.904 Km. Através da Figura 5.14 é possível visualizar-se facilmente através do declive das rectas representativas do MTBF médio da frota o benefício esperado resultante da implementação das soluções propostas face ao actual cenário.

Além deste benefício, julga-se que este tipo de intervenção apresentada garante uma melhor gestão dos meios humanos pois evita a necessidade de intervenções correctivas não programadas que, de alguma forma, podem vir a provocar reparações imperfeitas. Nesta fase de análise relembra-se uma vez mais o facto de estes valores serem considerados como reporte das ocorrências, não correspondendo à imobilização das automotoras.

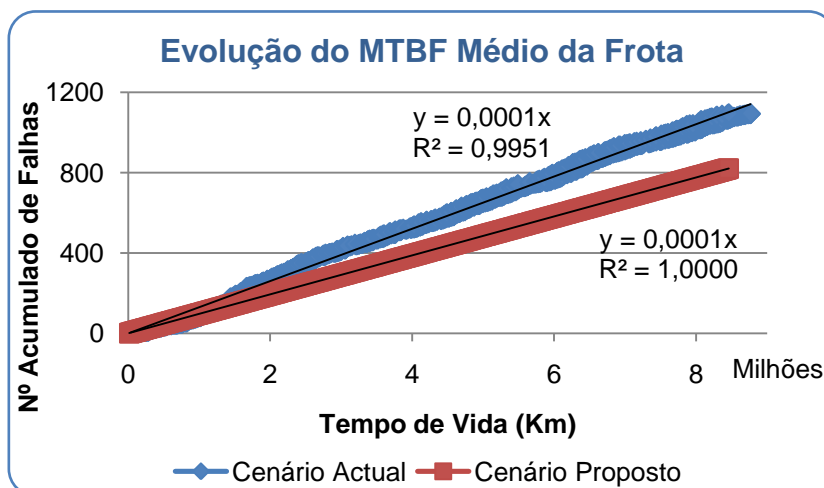


Figura 5. 14 – Evolução do MTBF médio da Frota em ambos os cenários.

5.5. Disponibilidade Operacional da Frota

Conhecido o MTBF médio da frota expectável, decidiu-se determinar a disponibilidade operacional actual da frota (D_{OP}), ainda que sem termo de comparação entre cenários. Tal decisão foi tomada visto julga-se que o conhecimento deste indicador de desempenho pode revelar-se útil à empresa.

Tendo em conta o histórico de dados considerado para o presente estudo (Figura 4.6), começou-se portanto por determinar os indicadores de desempenho necessários ao cálculo da disponibilidade. Apesar de estes indicadores se traduzirem no MTTR e MTBF, relacionados de acordo com a Equação 2.5, foi necessário proceder a uma adaptação dos mesmos, com o intuito de descrever o melhor possível a realidade prática.

No caso do $MTTR_{OP}$, decidiu-se quantificá-lo não através da relação entre o TTR e o número de falhas (Equação 2.4), mas sim através da relação entre os quilómetros não percorridos pela automotora e o número de automotoras que constituem a frota. Isto porque nos casos em que uma avaria não provoca a imobilização imediata da automotora, esta nem sempre é resolvida de imediato, possibilitando que a automotora continue a efectuar serviço comercial suportada na redundância dos seus sistemas. A mesma apenas deslocar-se-á à oficina para respectiva reparação quando de se encontrar livre segundo o sistema de rotação ou quando do momento de visita de manutenção preventiva planeada. Com base nestes factos, a quantificação do TTR revelou ser uma tarefa difícil, tendo-se optado pela decisão alternativa de cálculo do $MTTR_{OP}$.

Relativamente aos quilómetros não percorridos, consideram-se de acordo com a Figura 4.6 todos os períodos de tempo em que as automotoras se encontraram imobilizadas por motivo

de manutenção pesada (R2) e de ausência de serviço atribuído, visto serem estas as razões presenciadas dentro da janela de tempo analisada.

Note-se que nesta fase não foi tido em conta a componente referente às visitas periódicas de manutenção de linha pelo facto das mesmas apresentarem curtos períodos de tempo, considerando-se desse modo que as automotoras efectuem essas visitas nos períodos livres da rotação do serviço comercial.

Pelo facto de existir a possibilidade de nem todas as avarias serem resolvidas de imediato, a utilização do MTBF deixa igualmente de fazer sentido, razão pela qual se decidiu calcular a disponibilidade operacional com base no Tempo Médio Entre Reparações, do inglês *Mean Time Between Repair* ($MTBR_{OP}$). Esta relaciona deste modo os quilómetros percorridos pela frota de automotoras, ou seja, corresponde ao período de utilização das mesmas, tal como representado anteriormente na Figura 4.6.

Assim, a Disponibilidade Operacional é obtida, neste caso, através da seguinte expressão:

$$D_{OP} = \frac{MTBR_{OP}}{(MTBR_{OP} + MTTR_{OP})} \quad (5.1)$$

Tendo em conta a Equação 5.1, os três indicadores de desempenho apresentam os valores representados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Disponibilidade Operacional da frota.

	Km Percorridos ¹³	Km Não Percorridos ¹³	MTBR _{OP}	MTTR _{OP}	D _{OP} (%)
Período de Utilização	11.833.500	-	281.750	-	94,6
Período de Imobilização	-	671.300	-	15.983	

Observando a Tabela anterior, verifica-se portanto que a frota apresenta uma disponibilidade operacional de aproximadamente 95%, valor este que se julga ser bastante bom, dada a actual situação analisada.

Julga-se igualmente que o tipo de análise aqui efectuada em termos operacionais representa para a empresa uma mais valia na medida em que representa uma análise prática até então desconhecida por esta nestes moldes, fruto de todo o trabalho de investigação desenvolvido.

¹³ Quilometragem calculada para uma distância média percorrida de 350 Km diários nas linhas de Sintra e Azambuja.

Parte III

Capítulo 6

Conclusões Gerais

1. Conclusões

2. Propostas para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

O estudo desenvolvido no presente projecto de investigação procurou desde logo integrar simultaneamente a vertente académica com a profissional, com o intuito de facultar à empresa valor acrescentado, através da aplicação de conceitos e metodologias teóricas adquiridas.

Tendo em conta os objectivos inicialmente propostos, julga-se que os mesmos foram atingidos de forma positiva na medida em que foi possível obter um incremento significativo no valor do MTBF médio da frota, resultante da adopção das propostas de solução apresentadas. Deste modo, os resultados obtidos ao longo dos vários capítulos foram fundamentais para o culminar do sucesso observado, a começar desde logo com os resultados da primeira etapa do projecto, a análise estatística global da frota.

Pelo facto de possibilitar o estudo da evolução da taxa de falhas de cada automotora, assim como a identificação dos bens reparáveis com maior nível de criticidade em termos de incidência de falhas, esta análise veio a demonstrar-se uma mais valia para a empresa. Isto porque estão aqui em causa sistemas, designadamente automotoras, de natureza robusta e complexa, com elevado valor monetário associado aos seus mais diversos equipamentos e componentes.

Ainda que em muitos dos casos seja difícil modelar e analisar estatisticamente um conjunto de dados a fim de obter uma estimação da fiabilidade, a análise de sobrevivência demonstrou ser nesta fase inicial uma metodologia bastante útil em termos de modelação dos tempos de falha. Ainda que estes tenham sido facilmente obtidos através do histórico de falhas da plataforma informática adoptada na empresa, *InfoTec*, nem toda a informação estava disponibilizada nos moldes pretendidos para o desenvolvimento do presente projecto.

Assim, foi necessário proceder a um trabalho exaustivo e pormenorizado da modelação dos dados de forma a tornar possível atingir os objectivos perspectivados. Para isso foi necessário, por um lado, proceder a um cruzamento de informação desta plataforma com a plataforma de

gestão SAP, com o intuito de obter os quilómetros efectuados pelas automotoras até à data da falha. Por outro lado foi necessário proceder à consulta de registos em papel referentes à identificação dos sistemas onde as falhas ocorreram, como resultado da sua ausência na plataforma informática por razões de falha humana.

Com base na consulta pessoal e no *feed-back* adquirido dos técnicos no terreno relativamente às funcionalidades existentes e inexistentes da plataforma *InfoTec*, chegou-se à conclusão que a optimização de algumas destas poderia acrescentar valor à própria plataforma, tanto em termos de inserção/consulta de informação quanto de futuras análises de manutenção e fiabilidade. Nesse sentido, com o intuito de perspectivar melhorias, recomendam-se algumas acções práticas, nomeadamente:

- ✓ Especificar dentro de um LRU qual o componente em concreto avariado a fim de evitar situações ambíguas, como é o caso dos GTO, que apresentam actualmente a nomenclatura de avaria “GTO A1, A2, A11 e A12 e GTO A3, A4, A5, A13, A14 e A15”;
- ✓ Criar igualmente uma funcionalidade de registo para as *Gates Unit* que não apresentam actualmente um campo de registo que distinga qual a sua posição na UQE;
- ✓ Associar o registo dos quilómetros percorridos à identificação das avarias, de forma a facilitar rapidamente uma análise e controlo dos tempos de vida dos LRU.

Nesta fase de análise estatística da frota, o recurso ao teste de *Laplace* representou igualmente uma vantagem em termos de análise da tendência dos tempos de falha das automotoras. Assim, em termos de análise individual, comprovou-se que de entre o universo das 42 automotoras, 34 apresentam uma taxa de falhas constante, comprovando-se consequentemente de forma global que a frota é caracterizada por um PPH. Por um lado, a comprovação deste resultado seria expectável visto que as automotoras encontram-se actualmente a metade do seu ciclo de vida, ou seja no seu período útil de utilização. Contudo, julga-se que a boa prática de gestão da manutenção a que a frota tem vindo a ser sujeita tem contribuído igualmente para o resultado observado.

No caso das restantes 8 automotoras que apresentam uma taxa de falhas decrescente, chegou-se à conclusão que a justificação residia no facto de algumas das automotoras terem entrado ao serviço comercial imediatamente após terem regressado da revisão geral R2, onde permaneceram imobilizadas durante um período de tempo significativo. Em resultado desta imobilização temporária, factores externos como pó e humidade essencialmente, viriam a provocar a ocorrência de diversas falhas que com o tempo viriam a reduzir e estabilizar. Ainda entre estas 8 automotoras assistiu-se igualmente em algumas delas, em específico na UQE 2317 e UQE 2329, a um decréscimo acentuado da ocorrência de falhas justificável não pelas razões anteriores mas sim e respectivamente, pela elevada incidência de falhas no LRU crítico *Gate Unit* e em LRU de tipologia diversa, durante um período de tempo relativamente curto. De

realçar que nesta fase de análise, a elevada proximidade com os engenheiros e técnicos no terreno demonstrar-se-ia essencial para a aferição destas conclusões fidedignas.

Julga-se igualmente importante mencionar o facto de nenhuma automotora ter apresentado uma taxa de falhas crescente, facto que comprova uma vez mais o que foi dito anteriormente acerca de as automotoras se encontrarem actualmente a cerca de metade do seu ciclo de vida. Contudo, assiste-se a uma franca tendência para este tipo de taxa nas UQE 2306, 2313, 2318, 2319 e 2342, resultante de uma elevada e anormal ocorrência de falhas no LRU *Gate Unit*. Nesse sentido, e com o intuito de contrariar a tendência, aconselha-se a adopção das operações de rastreio técnico propostas.

Ainda nesta primeira etapa procedeu-se à identificação dos bens críticos que mais afectam a frota. Para isso recorreu-se ao Princípio de Pareto, que sendo uma ferramenta estatística de fácil aplicação e possibilitando uma análise clara e concisa, permitiu identificar como críticos os LRU *Gate Unit*, Comando de Limpa Vidros, Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico e Cartas de Entradas/Saídas, responsáveis por aproximadamente 83% das falhas observadas. Dada a experiência e intuição dos engenheiros e técnicos no terreno, foi possível comprovar não só as suspeitas já existentes perante os três primeiros LRU como ainda identificar o último LRU como sendo crítico.

A nível de indicadores de desempenho, foi possível aferir que a frota de UQE S2300 pode ser caracterizada, em termos médios, por um MTBF correspondente a 8.646 Km. Com o intuito de avançar para a segunda etapa do projecto, que responde por sua vez ao objectivo principal inicialmente traçado de determinar qual o incremento provocado no MTBF, foi necessário assumir alguns pressupostos sob os bens críticos entre mãos.

Tendo em conta que um dos pressupostos passou desde logo por assumir o tipo de solução que se iria implementar para cada bem, decidiu-se equacionar no caso dos LRU *Gates Unit* a simulação de um plano de manutenção preventiva ao invés da sua substituição por novos, não sendo no entanto, totalmente descartável pela empresa esta última opção. Tal decisão foi tomada em função de se julgar que esta seja a melhor opção para a empresa dada a sua actual condição financeira, justificada em grande parte pela conjuntura económica em que o país se encontra.

Sendo estes os LRU mais críticos, chegou-se à conclusão ao longo do projecto que estes são igualmente os que mais dificuldades apresentam em termos da boa prática de gestão da sua manutenção, no sentido em que se sabe que a sua substituição integral por novos acarreta elevados custos de aquisição.

Dito isto, com a intenção de aumentar a fiabilidade destes LRU de 60 para 85%, desenvolveu-se um plano de manutenção preventiva, modelando os tempos de vida através da distribuição de *Weibull*, que se julga ser a mais indicada para este tipo de LRU – electrónicos. Daqui veio a

aferir-se que para garantir a fiabilidade pretendida em 95% dos casos, se deve intervir periodicamente de 120 em 120 dias ou de 42.270 Km, considerando a média diária de quilómetros percorridos nas principais linhas comerciais. Visto que a visita periódica actual de manutenção preventiva mais próxima ocorre aos 40.000 Km, recomenda-se que sejam adicionadas a esta algumas acções práticas, nomeadamente:

- ✓ Efectuar um diagnóstico essencialmente visual ao LRU, com o propósito de encontrar indícios de que a avaria ocorrerá entretanto;
- ✓ Executar testes electrónicos de medição de parâmetros diversos com o intuito de comprovar o correcto funcionamento do LRU;
- ✓ Informar os maquinistas das possíveis consequências resultantes de uma inadvertida condução da UQE em função de condições diversas.

Com a adopção destas medidas espera-se que o número de falhas venha a diminuir das actuais 195 registadas para 29. Tendo em conta o sistema de funcionamento destes LRU nas UQE, concluiu-se ainda que as mesmas podem ficar completamente imobilizadas em 10% dos casos por motivo de avaria nestes LRU, afectando desse modo o serviço comercial que as mesmas se encontrem a realizar.

No caso dos LRU Comando de Limpa Vidros e Cartas de Entradas/Saídas decidiu-se que a melhor solução passaria pelas suas substituições, uma vez que se julga que estes não estão a usufruir significativamente com a reparação efectuada. Deste modo, assumindo que os LRU seguem uma distribuição Exponencial Negativa, observou-se respectivamente para uma nova taxa de 0,45 e 0,64 falhas por milhão de quilómetros percorridos, uma redução expectável de 52 e 17 avarias no registo actual.

Por sua vez, tendo em conta a evolução do histórico da ocorrência de falhas do LRU Tubagem e Flexíveis do Circuito Frigorífico, que tendencialmente veio a diminuir ao longo dos três anos de estudo devido à reengenharia do seu processo, decidiu-se considerar a redução na totalidade das falhas registadas. Deste modo, assiste-se a uma redução de 41 avarias.

Conhecido o novo “patamar” de falhas da frota, resultante das soluções propostas, procedeu-se ao cálculo do MTBF representativo da frota tendo-se aferido um valor de 11.550 Km. Deste modo, assiste-se portanto a um incremento de 2.904 Km correspondente a 33,6%, face ao actual cenário, o qual se julga representar um benefício significativo. De realçar que o cenário proposto não incluiu um plano financeiro das alterações necessárias, uma vez que este tipo de estudo não se enquadra dentro do âmbito do presente projecto, pelo que o seu desenvolvimento caberá à CP ou EMEF em prol do eventual interesse da sua implementação.

Em termos de disponibilidade operacional da frota, aferiu-se que esta apresenta um valor de aproximadamente 95%, o qual se julga ser bastante elevado dada a situação analisada. Significa isto que este indicador é influenciado até certo ponto pelo facto do estudo ter incidido

numa janela de tempo na qual parte da frota foi alvo da revisão de manutenção pesada R2. Caso o presente estudo tivesse incidido numa outra janela de tempo, assistir-se-ia muito provavelmente a um aumento da disponibilidade.

Face ao estudo prático apresentado e respectivos resultados alcançados, considera-se de um modo global ter atingido os objectivos inicialmente delineados, apresentando-se por um lado uma análise estatística com contributo inovador referente à frota de automotoras da S2300 e, por outro, um *output* de proposta de solução para os problemas existentes nos bens geradores de uma elevada incidência de falhas.

No cômputo geral, a realização do presente projecto foi bastante gratificante tanto em termos profissionais quanto pessoais na medida em que se julga ter acrescentado valor para a empresa ao mesmo tempo que esta proporcionou uma porta de abertura de conhecimento de um sector tão vasto e interessante como se trate do sector ferroviário.

6.2. Propostas para Trabalhos Futuros

Uma vez que os processos de melhoria são contínuos dentro de uma organização, existem muitas outras análises técnicas que poderão ser realizadas com o intuito de atingir determinados níveis de excelência. Deste modo, dentro da área de fiabilidade e manutenção ferroviária, sugerem-se as seguintes aplicações futuras:

- ❖ Desenvolvimento de estudo financeiro da proposta de solução apresentada na presente dissertação com o intuito de aferir a sua viabilidade de implementação em termos de custo – benefício;
- ❖ Extensão de aplicação do estudo apresentado na presente dissertação às frotas de UQE S2400 e S3500, visto serem igualmente da responsabilidade da oficina onde o projecto foi desenvolvido;
- ❖ Tendo em conta que a frota de UQE S2300 foi recentemente alvo de um programa de modernização, julga-se ser interessante desenvolver um estudo comparativo direccionado aos sistemas e equipamentos intervencionados (substituídos ou reparados), que permita quantificar em termos de indicadores de desempenho como se trate do MTBF por exemplo, se as referidas intervenções efectuadas trouxeram ou não benefícios significativos, face ao cenário que antecede a modernização;
- ❖ Uma vez que o presente estudo não incluiu a adopção da metodologia PHM, sugere-se a aplicação desta à frota estudada ou a uma outra em dois âmbitos distintos; um implica a sua utilização com o propósito de identificar os sistemas críticos e em função disso analisar a função de risco que cada uma destas variáveis significativas apresenta faces às restantes, procedendo-se respectivamente à concretização de um plano de manutenção preventiva adequado. Uma outra abordagem poderá passar por aplicar o

mesmo raciocínio mas apenas para as 22 posições dos LRU *Gates Unit* nas automotoras, com o intuito de determinar quais de entre estas apresentam uma função de risco superior e qual a sua proporção face às restantes.

- ❖ Por último, e ainda relativamente aos LRU *Gates Unit*, sugere-se o desenvolvimento de um estudo que envolva os sistemas adjacentes a estes LRU, como se tratem por exemplo dos GTO, com o intuito de analisar se existem relações de dependência resultantes do facto destes experimentarem a falha e induzirem por sua vez avaria às *Gates Unit*.

Bibliografia

- Abate, M., Lijesen, M., Pels, E., Roelevelt, A.** (2013), The Impact of Reliability on the Productivity of Railroad Companies, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 51(0), 41-49.
- Åhrén, T. & Parida, A.** (2009a), Maintenance Performance Indicators (MPIs) for Benchmarking the Railway Infrastructure: A Case Study, *Benchmarking: An International Journal*, 16(2), 247-258.
- Åhrén, T. & Parida, A.** (2009b), Overall Railway Infrastructure Effectiveness (ORIE): A Case Study on the Swedish Rail Network, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15(1), 17-30.
- Al-Najjar, B.** (2007), The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business, *International Journal of Production Economics*, 107(1), 260-273.
- Allison, Paul D.** (2010), *Survival Analysis Using SAS* (2 ed.) (pp. 324), Cary, USA: SAS Institute Inc. 978-1-59994-640-5.
- Alsyouf, I.** (2006), Measuring Maintenance Performance using a Balanced Scorecard Approach, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(2), 133-149.
- Alsyouf, I.** (2007), The Role of Maintenance in Improving Companies' Productivity and Profitability, *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70-78.
- Ansell, J. I. & Phillips, M. J.** (1994), *Practical Methods for Reliability Data Analysis* ((pp. 240), New York: Oxford University Press Inc. 0-19-853664-x.
- Ascher, H. & Feingold, H.** (1984), *Repairable Systems Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and Their Causes* (Vol. 7), New York: Marcel Dekker, Inc., 978-0-8247-7276-5.
- Assis, R.** (2004), *Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção: Fiabilidade e Manutenibilidade* (1 ed.) (pp. 3-24), Lisboa, Coimbra e Porto: LIDEL, Lda, 978-972-757-298-4.
- Basu, R.** (2004), *Implementing Quality* ((pp. 313), Bedford Row, London: Thomson Learning 978-1-84480-057-5.
- Ben-Daya, M., Aint-Kadi, D., Knezevic, J., Raouf, A.** (2009), *Handbook of Maintenance Management and Engineering* ((pp. 741), London: Springer-Verlang 978-1-84882-471-3.

- Bollen, M. H. J.** (1993), *Literature Search for Reliability Data of Components in Electric Distribution Networks* (pp. 55, 56 and 59), Eindhoven, The Netherlands: Faculty of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology.
- Cabral, J. S.** (1998), *Organização e Gestão da Manutenção: Dos Conceitos à Prática* (3 ed.), Lisboa, Porto e Coimbra: LIDEL, 978-972-757-052-2.
- Carrarini, A.** (2007), Reliability Based Analysis of the Crosswind Stability of Railway Vehicles, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(7), 493-509.
- Carretero, J., Pérez, José M., García-Carballeira, F., Calderón, A., Fernández, J., García, Jose D., Lozano, A., Cardona, L., Cotaina, N., Prete, P.** (2003), Applying RCM in Large Scale Systems: A Case Study with Railway Networks, *Reliability Engineering & System Safety*, 82(3), 257-273.
- CEN, Comité Europeu de Normalização.** (2010). *Norma EN 13306: Maintenance - Maintenance terminology*. Bruxelas.
- Chen, M. & Nakagawa, T.** (2013), Optimal Redundant Systems For Works With Random Processing Time, *Reliability Engineering & System Safety*.
- Corriere, F. & Di Vincenzo, D.** (2012), The Rail Quality Index as an Indicator of the “Global Comfort” in Optimizing Safety, Quality and Efficiency in Railway Rails, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 1089-1098.
- CP, Comboios de Portugal** (2013), Urbanos - Lisboa, Consultado em: 10 de Fevereiro de 2013.
- Dias, J. A. M.** (2002), *Fiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica*, Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.
- Dias, J. A. M., Pereira, Z. L. , Leitão, A. F.** (1999), *Sistemas Reparáveis: Modelos de Fiabilidade*, Artigo apresentado na Conferência: Segurança, Fiabilidade e Análise de Avarias, Escola Naval do Alfeite, Almada.
- Dodson, B.** (2006), *The Weibull Analysis Handbook* (2 ed.) (pp. 167), Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality, Quality Press 0-87389-667-x.
- Dullaert, W. & Zamparini, L.** (2013), The Impact of Lead Time Reliability in Freight Transport: A Logistics Assessment of Transport Economics Findings, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 190-200.
- Evans, A. W.** (2011), Fatal Train Accidents on Europe's Railways: 1980–2009, *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 391-401.

-
- Feldman, R. M. & Valdez-Flores, C.** (2010), *Applied Probability and Stochastic Processes* (2 ed.) (pp. 397), London, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-642-05155-5.
- Ghosh, S. & Majumdar, S. K.** (2011), Reliability Modeling and Prediction using classical and Bayesian Approach: A Case Study, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 28(5), 31.
- Glade, T., Albini, P., Francés, F.** (2001), *The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments* ((pp. 220), Dordrecht, Netherland: Kluwer Academic 978-0-7923-7154-0.
- Golmakani, H. R. & Fattahipour, F.** (2011), Age-based Inspection Scheme for Condition-Based Maintenance, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 93-110.
- Goverde, R. M. P. & Meng, L.** (2011), Advanced Monitoring and Management Information of Railway Operations, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 1(2), 69-79.
- Gupta, A. K., Zeng, W., Wu, Y.** (2010), *Probability and Statistical Models* ((pp. 267), London: Springer Science + Business Media 978-0-8176-4986-9.
- Holmgren, M.** (2005), Maintenance-related Losses at the Swedish Rail, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11(1), 5-18.
- Ito, M. & Nagai, K.** (2008), Degradation Issues of Polymer Materials used in Railway Field, *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), 1723-1735.
- Jensen, A.** (1998), Competition in Railway Monopolies, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34(4), 267-287.
- Klein, J. P. & Moeschberger, M. L.** (2003), *Survival Analysis: Techniques for Censored and Truncated Data* (2 ed.), New York: Springer Science + Business Media, Inc. 0-387-95399-x.
- Kobbacy, K. A. & Murthy, D. P.** (2008), *Complex System Maintenance Handbook* ((pp. 656), London: Springer-Verlang 978-1-84800-010-0.
- Macchi, M., Garetti, M., Centrone, D., Fumagalli, L., Piero Pavirani, G.** (2012), Maintenance Management of Railway Infrastructures Based on Reliability Analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, 104(0), 71-83.
- Marques, S.** (2009), *Manutenção Industrial e Custo do Ciclo de Vida – Extração de Oleaginosas*, Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica.
- Mishra, R. C. & Pathak, K.** (2006), *Maintenance Engineering and Management* (4 ed.) (pp. 217), New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited 978-81-203-1746-8.
-

-
- O'Connor, P.** (1991), *Practical Reliability Engineering* (3 ed.), Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 978-0-471-92902-4.
- O'Connor, P. & Kleyner, A.** (2012), *Practical Reliability Engineering* (5 ed.) (pp. 143-146), United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd 978-0-470-97981-5.
- Pintelon, L., Pinjala, S. K., Vereecke, A.** (2006), Evaluating the Effectiveness of Maintenance Strategies, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(1), 7-20.
- Pinto, C. V.** (1999), *Organização e Gestão da Manutenção* (1 ed.), Lisboa: Monitor - Projectos e Edições, Lda, 978-972-9413-39-1.
- Profillidis, V. A.** (2006), *Railway Management and Engineering* (3 ed.) (pp. 469), England: Ashgate Publishing, Ltd. 978-0-7546-4854-3.
- Ryan, T. P.** (2007), *Modern Engineering Statistics* ((pp. 609), Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 978-0-470-08187-7.
- Saleh, J. H. & Castet, J.** (2011), *Spacecraft Reliability and Multi-State Failures* ((pp. 216), United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd 978-0-470-68791-8.
- Sciutto, G.** (2010), *Safety and Security in Railway Engineering* (Vol. 45, pp. 30), Great Britain: WIT Press, 978-1-84564-496-3.
- Van Horenbeek, A., Buré, J., Cattrysse, D., Pintelon, L., Vansteenwegen, P.** (2012), Joint Maintenance and Inventory Optimization Systems: A Review, *International Journal of Production Economics*, (0).
- Weiseth, M., Heggland, P., Wien, I., Olsson, N. O. E., Stokland, Ø.** (2011), Development of a Punctuality Improvement Method, *The TQM Journal*, 23(3), 268-283.
- Venkataraman, K.** (2010), *Maintenance Engineering and Management* (4 ed.) (pp. 248), New Dehli: Prentice-Hall Learning Private Limited 978-81-203-3130-3.
- Vromans, M. J. C. M., Dekker, R., Kroon, L. G.** (2006), Reliability and Heterogeneity of Railway Services, *European Journal of Operational Research*, 172(2), 647-665.
- Waeyenbergh, G. & Pintelon, L.** (2002), A Framework for Maintenance Concept Development, *International Journal of Production Economics*, 77(3), 299-313.
- Walker, I. R.** (2011), *Reliability in Scientific Research: improving the dependability of measurements, calculations, equipment and software* (1 ed.) (pp. 2-3), New York: Cambridge University Press 978-0-521-85770-3.
- Yang, G.** (2007), *Life Cycle Reliability Engineering* (1 ed.) (pp. 47-48), Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc 978-0-471-71529-0.

APÊNDICES

Apêndice A

Apêndice A1 – Síntese dos parâmetros das automotoras, necessários à aplicação do teste de *Laplace*.

Apêndice A2 – Representação gráfica dos testes de *Laplace* das automotoras.

Apêndice A3 – Dados necessários à estimativa dos MTBF, MTBF mínimos garantidos e intervalos de confiança das automotoras.

Apêndice A4 – Gráfico da ocorrência das falhas da frota de UQE S2300.

Apêndice A5 – Tabelas e diagramas de Pareto dos sistemas e subsistemas da frota.

Neste Apêndice é apresentada informação em formato gráfico que auxilia a uma melhor compreensão da análise efectuada no Capítulo 4.

Apêndice B

Apêndice B1 – Tabela com tempos de vida considerados e tempos de vida excluídos (*outliers*) do LRU *Gate Unit*.

Neste Apêndice é apresentada informação em formato tabelar que auxilia a uma melhor compreensão de parte da análise efectuada no Capítulo 5.

Apêndice A1 – Síntese dos parâmetros das automotoras, necessários à aplicação do teste de Laplace.

Tabela A1.1 – Síntese dos parâmetros da UQE 2301.

UQE 2301		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.175.283		
T (Km)	258.933	-2,81	1,65
α	0,10		
n_f	34		

Tabela A1.5 – Síntese dos parâmetros da UQE 2306.

UQE 2306		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.906.877		
T (Km)	287.216	1,13	1,65
α	0,10		
n_f	24		

Tabela A1.2 – Síntese dos parâmetros da UQE 2302.

UQE 2302		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.699.109		
T (Km)	263.131	0,37	1,65
α	0,10		
n_f	27		

Tabela A1.6 – Síntese dos parâmetros da UQE 2307.

UQE 2307		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.272.169		
T (Km)	270.037	0,82	1,65
α	0,10		
n_f	15		

Tabela A1.3 – Síntese dos parâmetros da UQE 2304.

UQE 2304		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.921.322		
T (Km)	260.829	-0,88	1,65
α	0,10		
n_f	33		

Tabela A1.7 – Síntese dos parâmetros da UQE 2308.

UQE 2308		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	5.915.647		
T (Km)	253.791	0,96	1,65
α	0,10		
n_f	43		

Tabela A1.4 – Síntese dos parâmetros da UQE 2305.

UQE 2305		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.247.116		
T (Km)	244.877	0,53	1,65
α	0,10		
n_f	25		

Tabela A1.8 – Síntese dos parâmetros da UQE 2309.

UQE 2309		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	5.950.256		
T (Km)	262.404	1,47	1,65
α	0,10		
n_f	40		

Tabela A1.9 – Síntese dos parâmetros da UQE 2310.

UQE 2310		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.313.006		
T (Km)	205.488	-0,81	1,65
α	0,10		
n_f	35		

Tabela A1.13 – Síntese dos parâmetros da UQE 2315.

UQE 2315		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.892.282		
T (Km)	259.367	-0,08	1,65
α	0,10		
n_f	38		

Tabela A1.10 – Síntese dos parâmetros da UQE 2311.

UQE 2311		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.494.877		
T (Km)	234.023	-0,70	1,65
α	0,10		
n_f	41		

Tabela A1.14 – Síntese dos parâmetros da UQE 2316.

UQE 2316		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.320.797		
T (Km)	256.657	-0,04	1,65
α	0,10		
n_f	26		

Tabela A1.11 – Síntese dos parâmetros da UQE 2313.

UQE 2313		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.633.907		
T (Km)	279.453	1,48	1,65
α	0,10		
n_f	22		

Tabela A1.15 – Síntese dos parâmetros da UQE 2317.

UQE 2317		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.060.285		
T (Km)	244.026	-2,33	1,65
α	0,10		
n_f	42		

Tabela A1.12 – Síntese dos parâmetros da UQE 2314.

UQE 2314		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.180.634		
T (Km)	258.004	-0,78	1,65
α	0,10		
n_f	27		

Tabela A1.16 – Síntese dos parâmetros da UQE 2318.

UQE 2318		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.943.804		
T (Km)	260.253	1,51	1,65
α	0,10		
n_f	33		

Tabela A1.17 – Síntese dos parâmetros da UQE 2319.

UQE 2319		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.714.123		
T (Km)	279.185	1,30	1,65
α	0,10		
n_f	23		

Tabela A1.21 – Síntese dos parâmetros da UQE 2323.

UQE 2323		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	1.656.322		
T (Km)	271.329	-0,83	1,65
α	0,10		
n_f	14		

Tabela A1.18 – Síntese dos parâmetros da UQE 2320.

UQE 2320		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.066.400		
T (Km)	223.063	-1,23	1,65
α	0,10		
n_f	41		

Tabela A1.22 – Síntese dos parâmetros da UQE 2324.

UQE 2324		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.894.723		
T (Km)	209.059	0,23	1,65
α	0,10		
n_f	27		

Tabela A1.19 – Síntese dos parâmetros da UQE 2321.

UQE 2321		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.058.565		
T (Km)	257.841	-1,20	1,65
α	0,10		
n_f	19		

Tabela A1.23 – Síntese dos parâmetros da UQE 2325.

UQE 2325		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	3.381.224		
T (Km)	261.141	-0,04	1,65
α	0,10		
n_f	26		

Tabela A1.20 – Síntese dos parâmetros da UQE 2322.

UQE 2322		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.441.225		
T (Km)	240.464	-0,26	1,65
α	0,10		
n_f	21		

Tabela A1.24 – Síntese dos parâmetros da UQE 2326.

UQE 2326		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	229.753		
T (Km)	36.699	-1,88	1,65
α	0,10		
n_f	17		

Tabela A1.25 – Síntese dos parâmetros da UQE 2327.

UQE 2327		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.741.118		
T (Km)	270.677	-0,99	1,65
α	0,10		
n_f	23		

Tabela A1.29 – Síntese dos parâmetros da UQE 2331.

UQE 2331		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.502.658		
T (Km)	270.309	0,40	1,65
α	0,10		
n_f	32		

Tabela A1.26 – Síntese dos parâmetros da UQE 2328.

UQE 2328		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.801.014		
T (Km)	262.772	-0,41	1,65
α	0,10		
n_f	38		

Tabela A1.30 – Síntese dos parâmetros da UQE 2332.

UQE 2332		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	1.688.155		
T (Km)	184.388	-1,69	1,65
α	0,10		
n_f	23		

Tabela A1.27 – Síntese dos parâmetros da UQE 2329.

UQE 2329		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.030.128		
T (Km)	255.582	-2,57	1,65
α	0,10		
n_f	23		

Tabela A1.31 – Síntese dos parâmetros da UQE 2333.

UQE 2333		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.833.699		
T (Km)	257.461	-0,70	1,65
α	0,10		
n_f	24		

Tabela A1.28 – Síntese dos parâmetros da UQE 2330.

UQE 2330		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	4.012.628		
T (Km)	282.818	-0,51	1,65
α	0,10		
n_f	30		

Tabela A1.32 – Síntese dos parâmetros da UQE 2334.

UQE 2334		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \bar{r}_i$ (Km)	2.796.444		
T (Km)	214.049	0,04	1,65
α	0,10		
n_f	26		

Tabela A1.33 – Síntese dos parâmetros da UQE 2335.

UQE 2335		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	1.891.419		
T (Km)	182.883	-0,84	1,65
α	0,10		
n_f	23		

Tabela A1.37 – Síntese dos parâmetros da UQE 2339.

UQE 2339		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	862.100		
T (Km)	147.922	-0,65	1,65
α	0,10		
n_f	13		

Tabela A1.34 – Síntese dos parâmetros da UQE 2336.

UQE 2336		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	857.711		
T (Km)	149.803	-2,33	1,65
α	0,10		
n_f	17		

Tabela A1.38 – Síntese dos parâmetros da UQE 2340.

UQE 2340		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	1.413.560		
T (Km)	212.101	0,16	1,65
α	0,10		
n_f	13		

Tabela A1.35 – Síntese dos parâmetros da UQE 2337.

UQE 2337		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	897.696		
T (Km)	170.924	-1,62	1,65
α	0,10		
n_f	14		

Tabela A1.39 – Síntese dos parâmetros da UQE 2341.

UQE 2341		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	700.175		
T (Km)	150.762	-2,55	1,65
α	0,10		
n_f	15		

Tabela A1.36 – Síntese dos parâmetros da UQE 2338.

UQE 2338		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	1.260.421		
T (Km)	122.961	-1,56	1,65
α	0,10		
n_f	25		

Tabela A1.40 – Síntese dos parâmetros da UQE 2342.

UQE 2342		Z_0	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$
$\sum \tau_i$ (Km)	1.487.811		
T (Km)	109.099	1,16	1,65
α	0,10		
n_f	24		

Apêndice A2 – Representação gráfica dos testes de *Laplace* das automotoras.

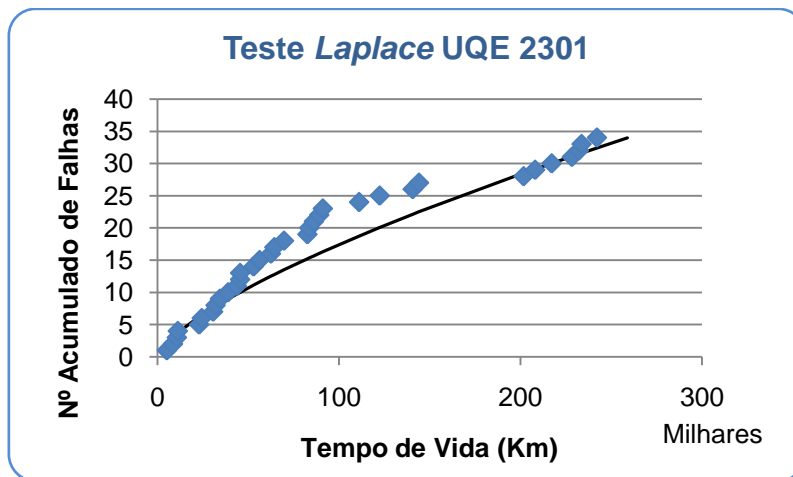


Figura A2.1 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2301.

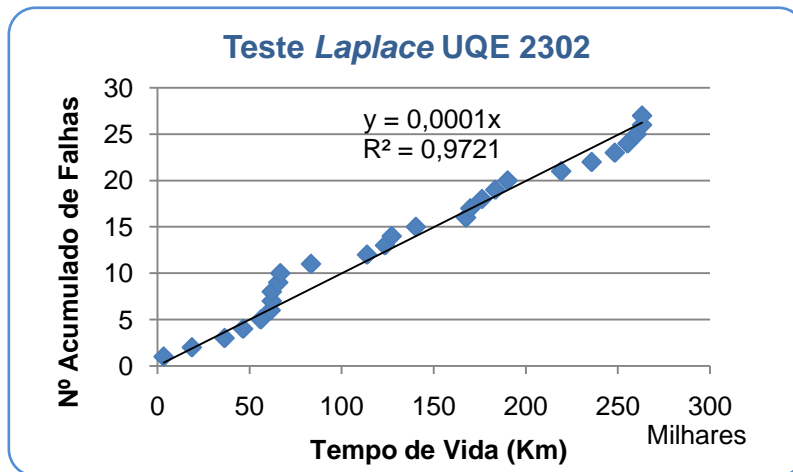


Figura A2.2 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2302.

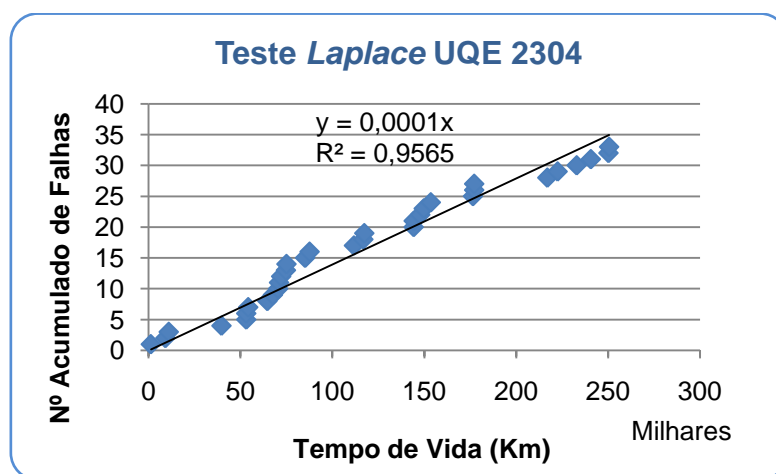


Figura A2.3 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2304.

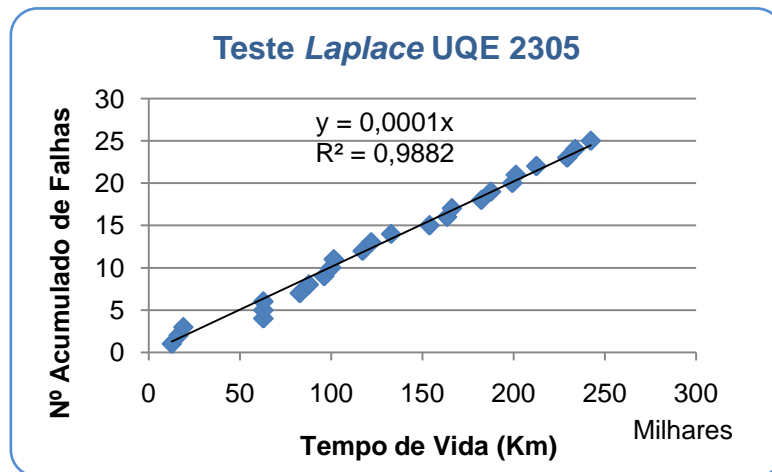


Figura A2.4 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2305.

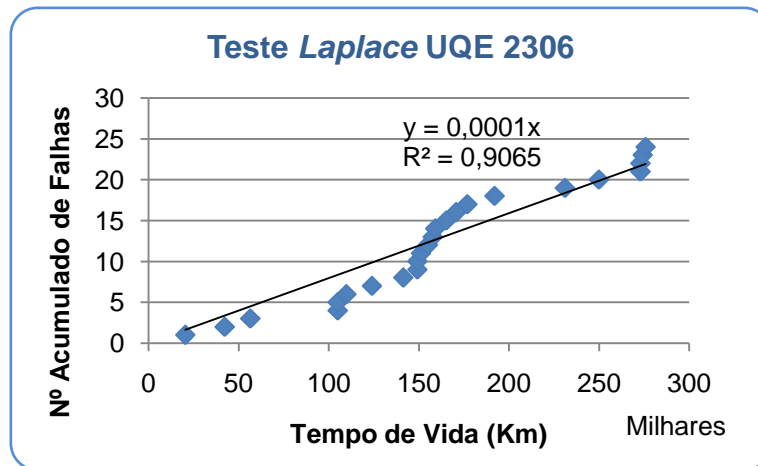


Figura A2.5 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2306.

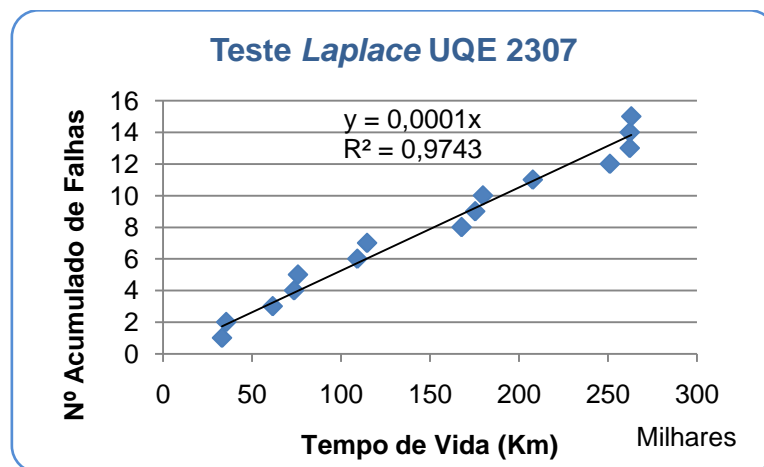


Figura A2.6 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2307.

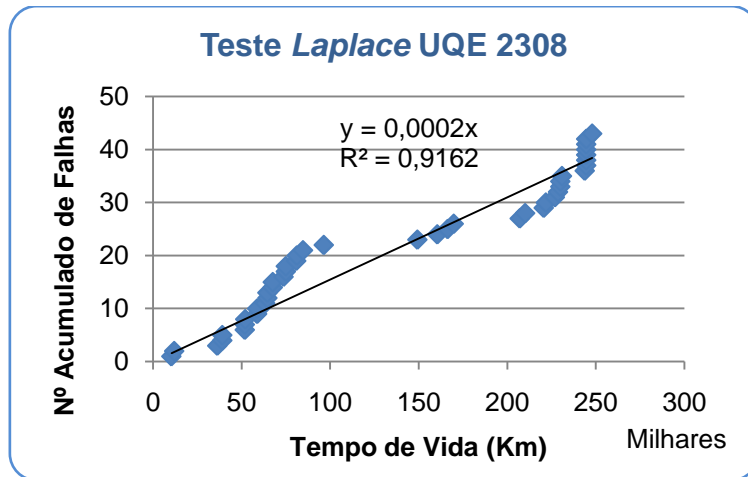


Figura A2.7 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2308.

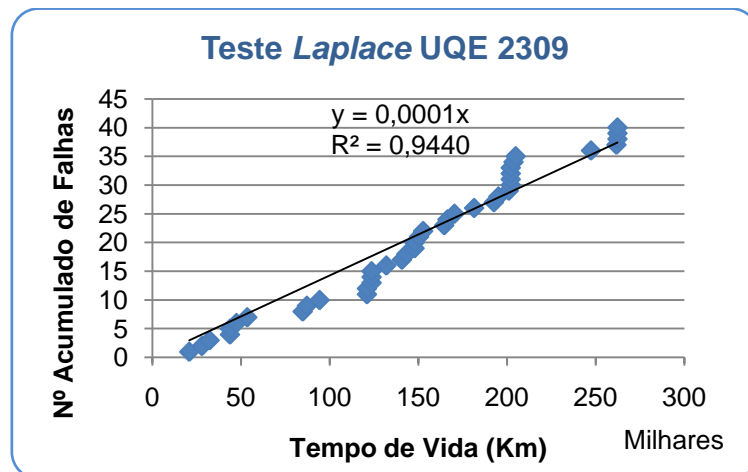


Figura A2.8 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2309.

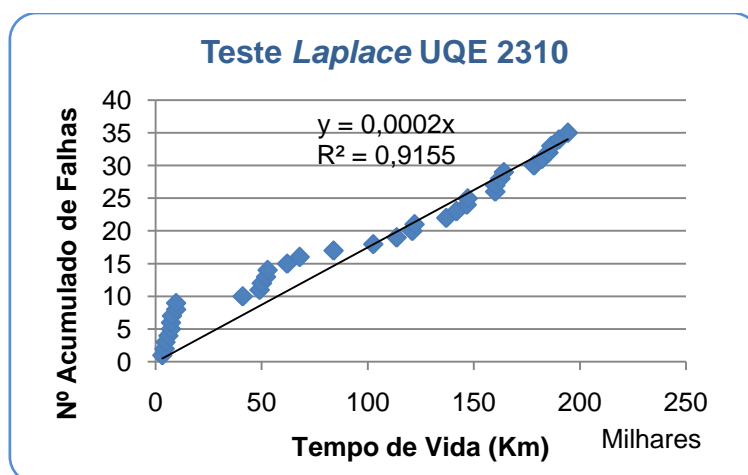


Figura A2.9 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2310.

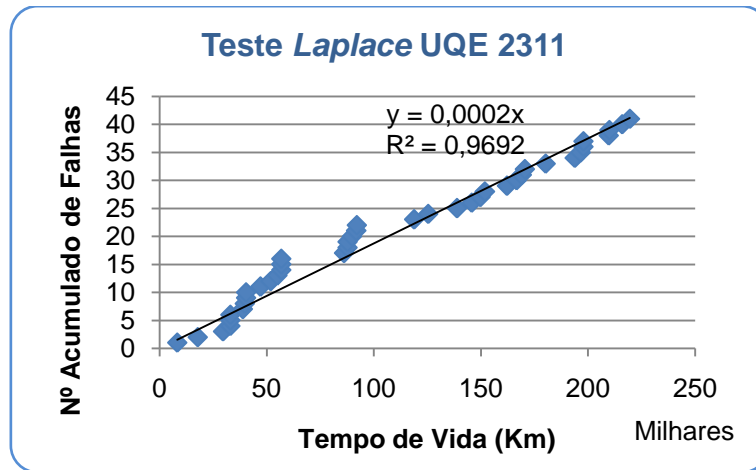


Figura A2.10 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2311.

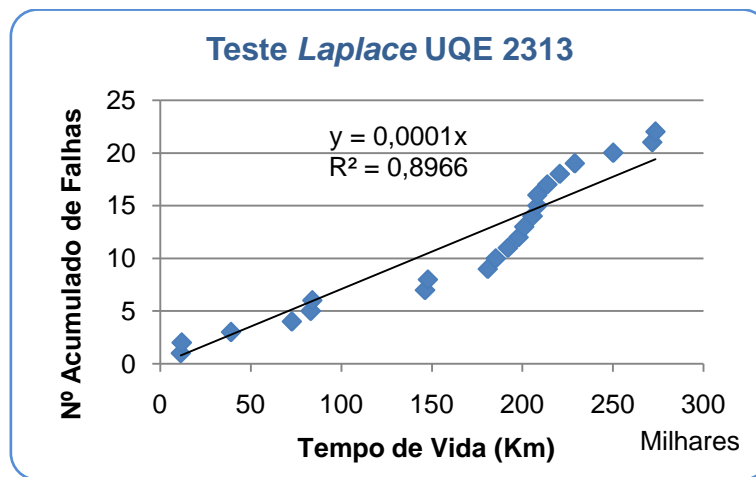


Figura A2.11 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2313.

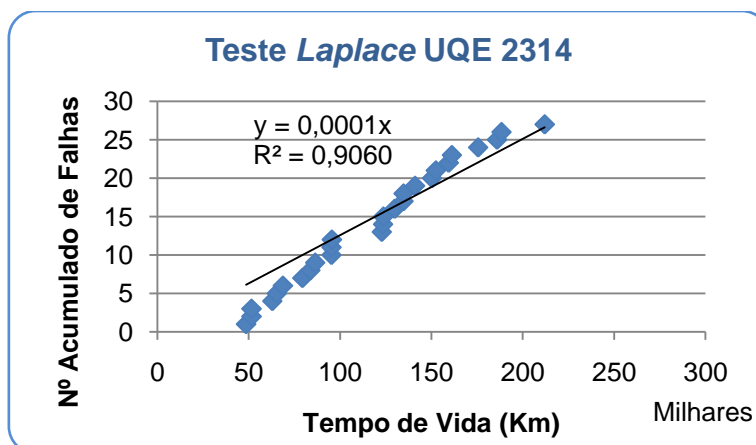


Figura A2.12 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2314.

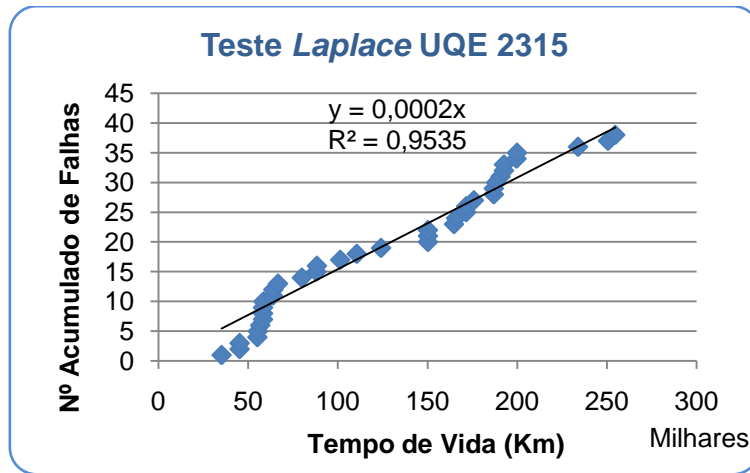


Figura A2.13 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2315.

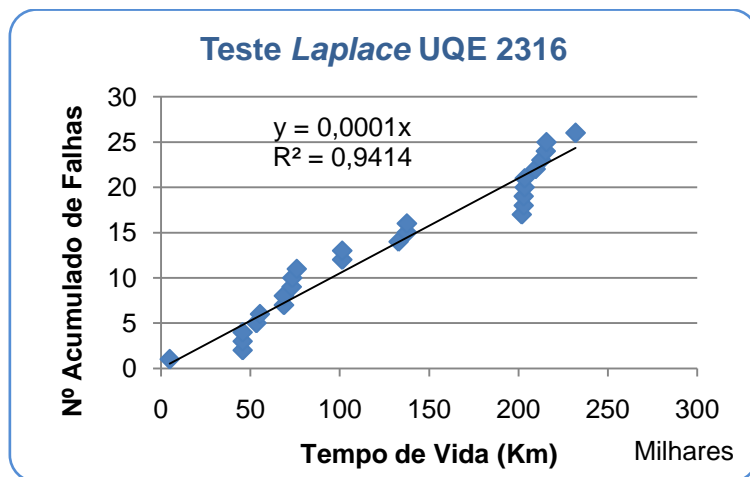


Figura A2.14 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2316.

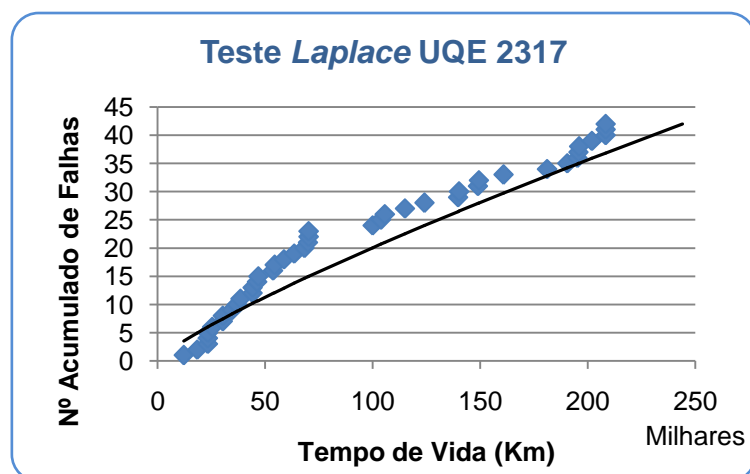


Figura A2.15 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2317.

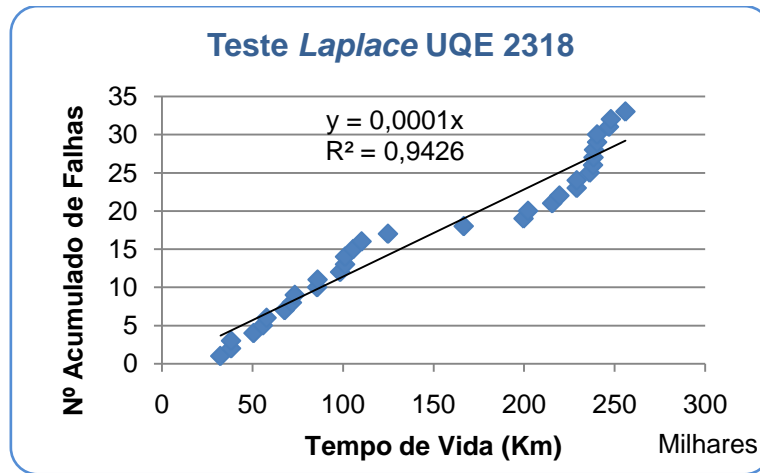


Figura A2.16 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2318.

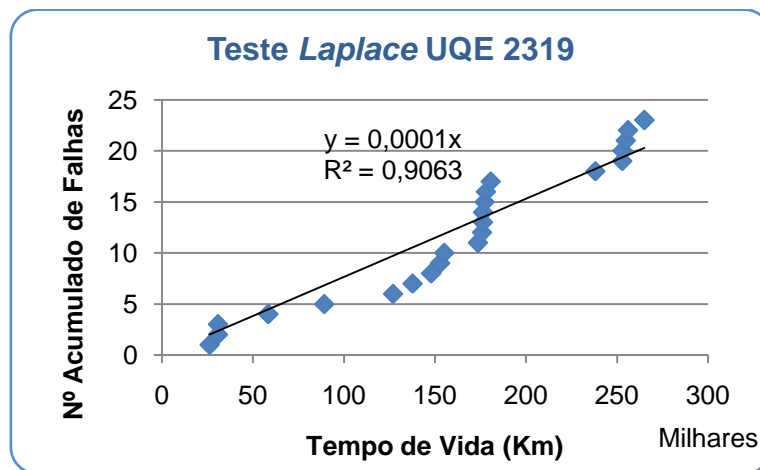


Figura A2.17 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2319.

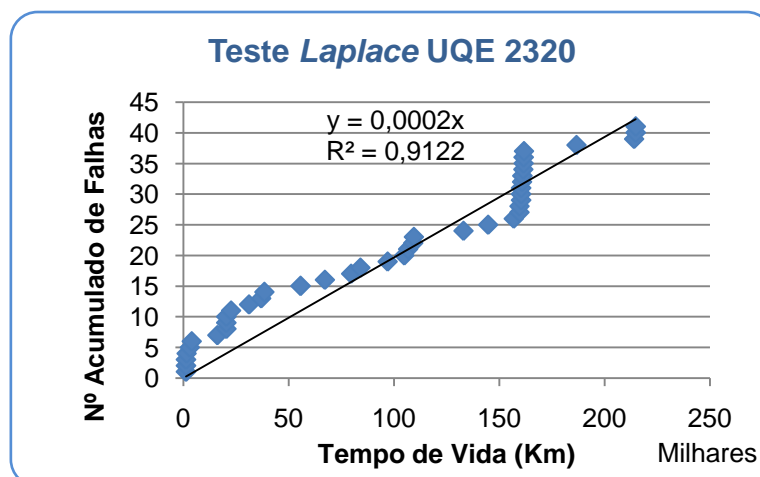


Figura A2.18 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2320.

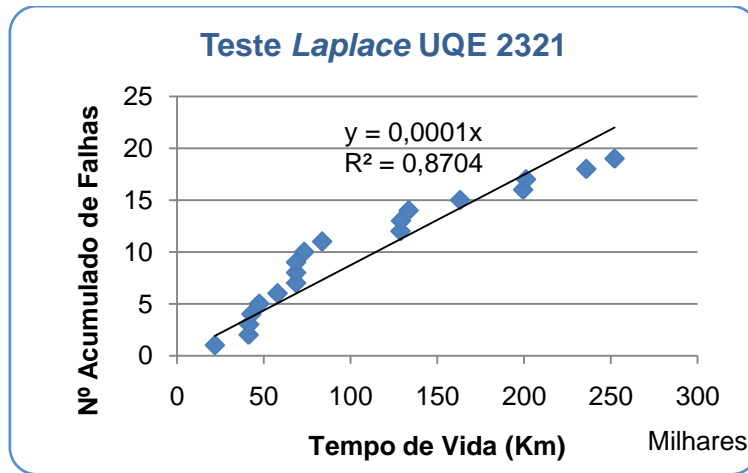


Figura A2.19 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2321.

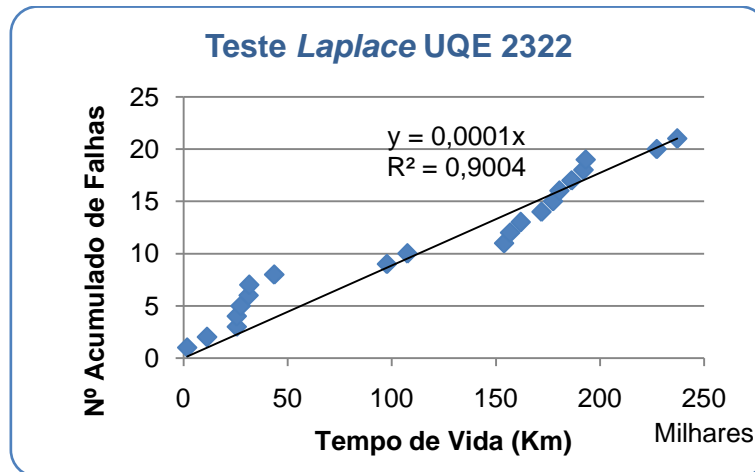


Figura A2.20 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2322.

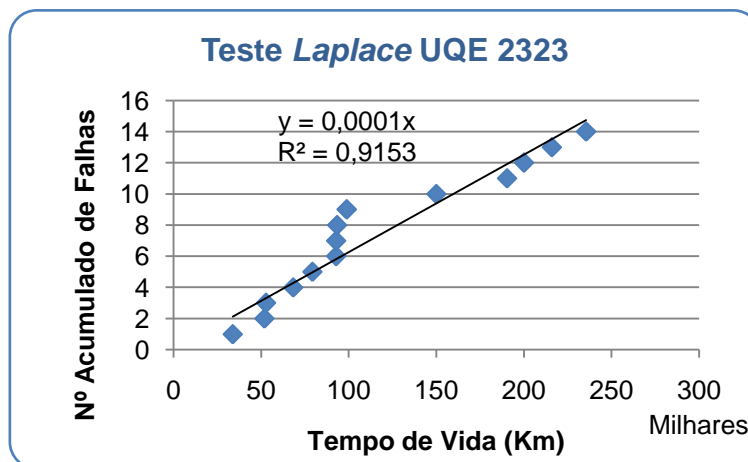


Figura A2.21 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2323.

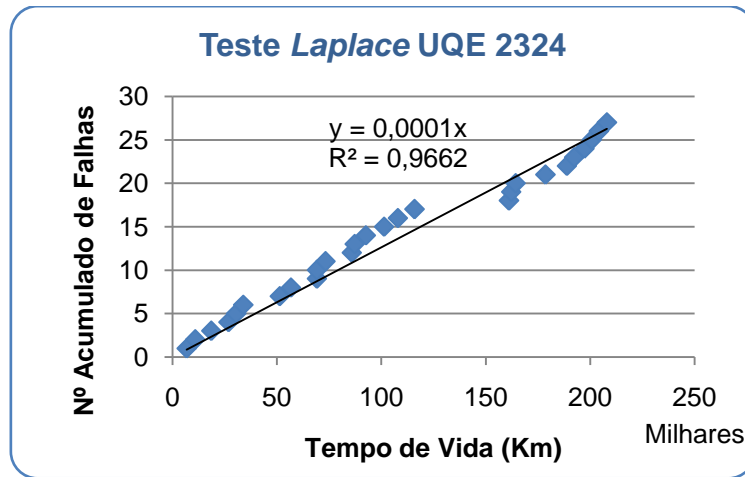


Figura A2.22 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2324.

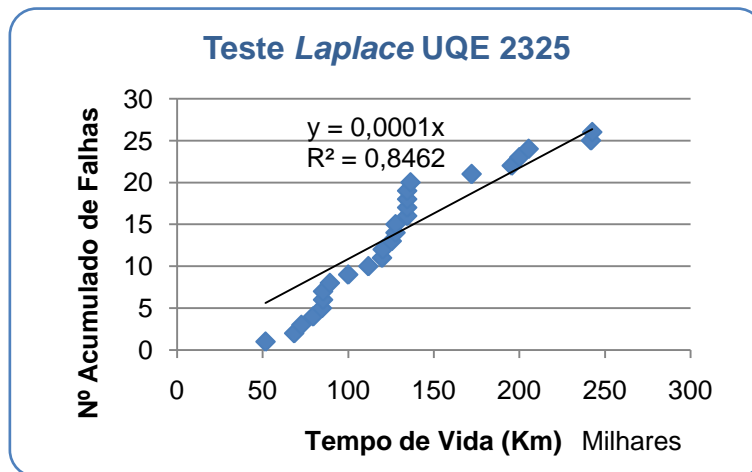


Figura A2.23 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2325.

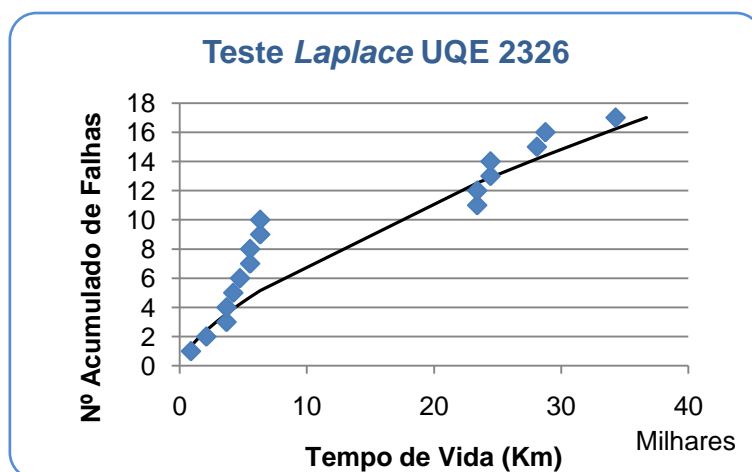


Figura A2.24 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2326.

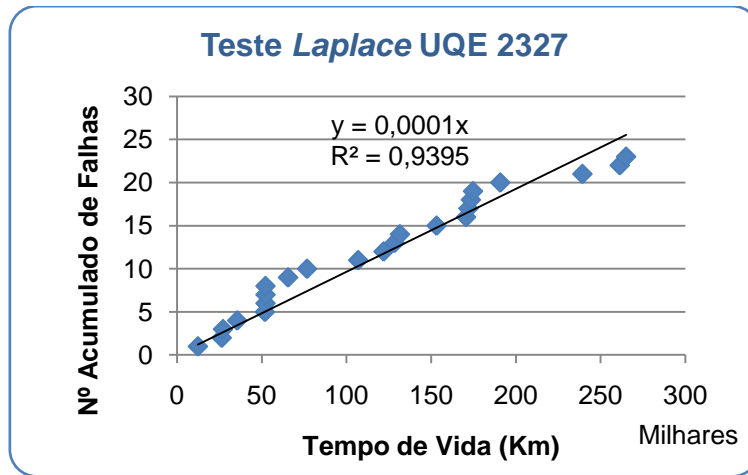


Figura A2.25 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2327.

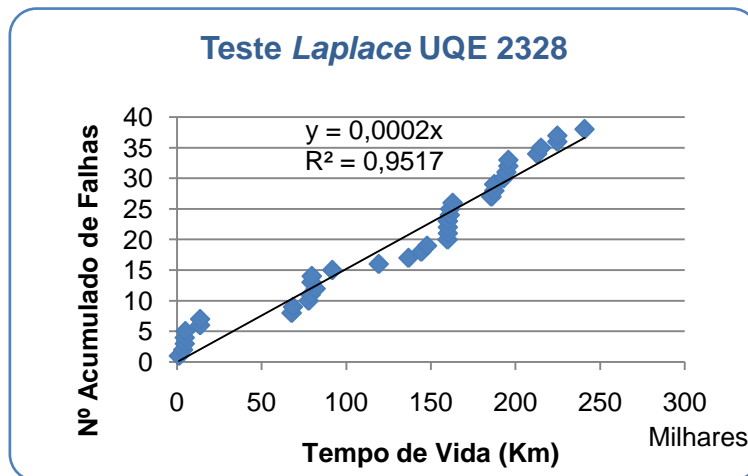


Figura A2. 26 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2328.

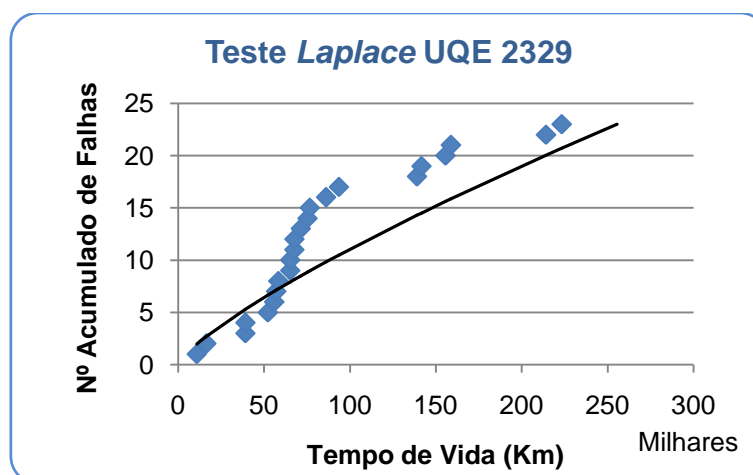


Figura A2.27 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2329.

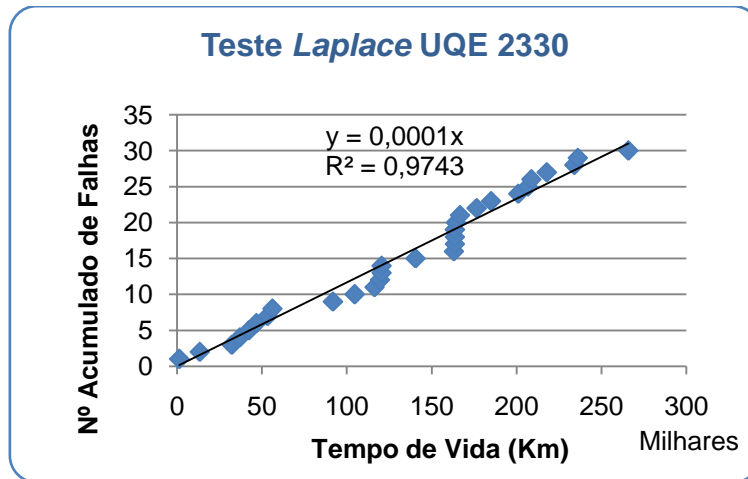


Figura A2.28 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2330.

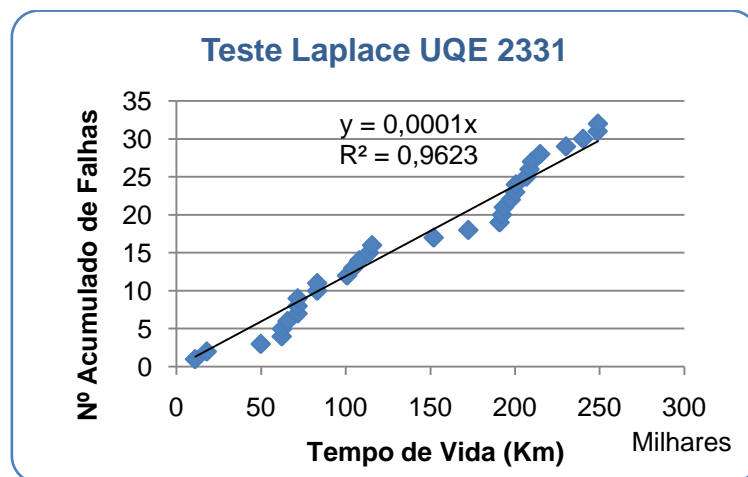


Figura A2.29 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2331.

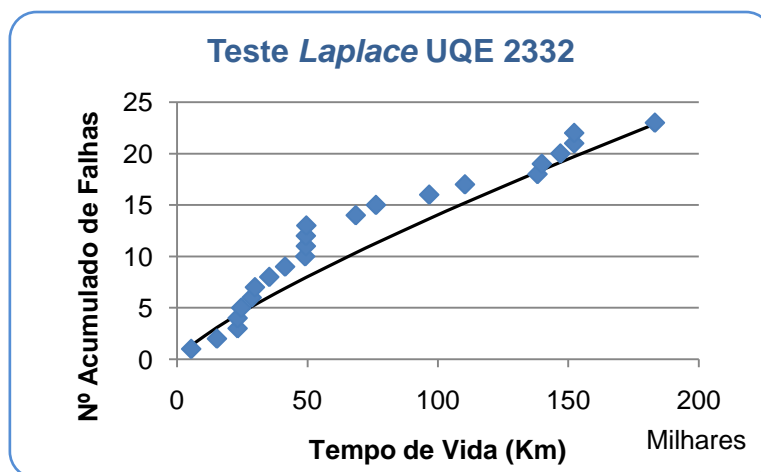


Figura A2.30 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2332.

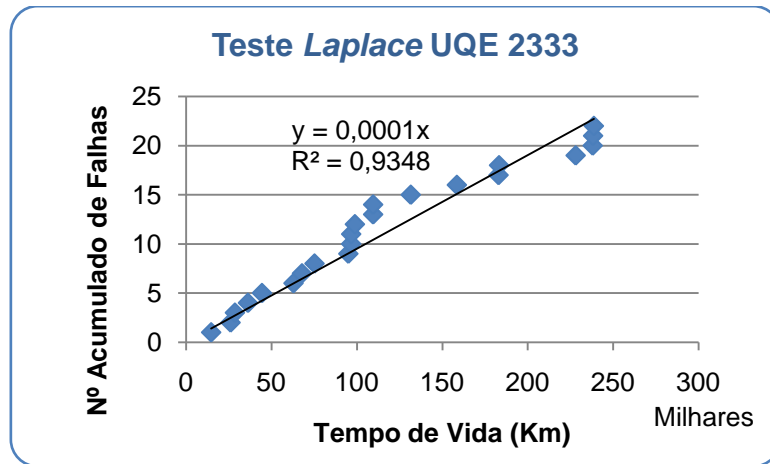


Figura A2.31 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2333.

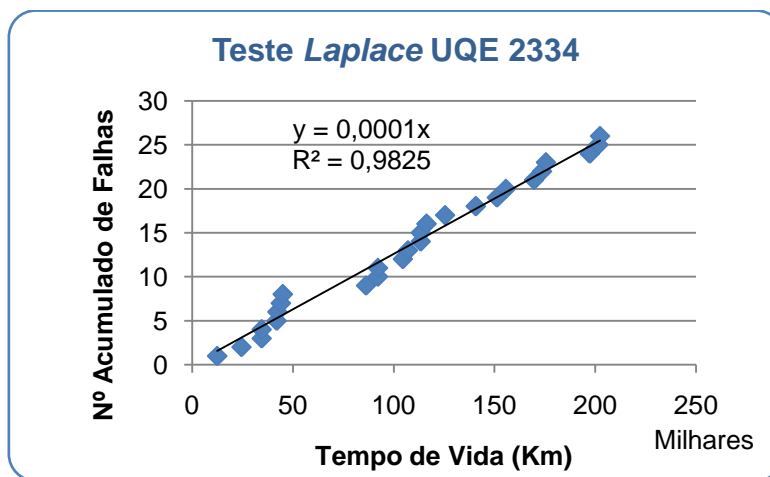


Figura A2.32 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2334.

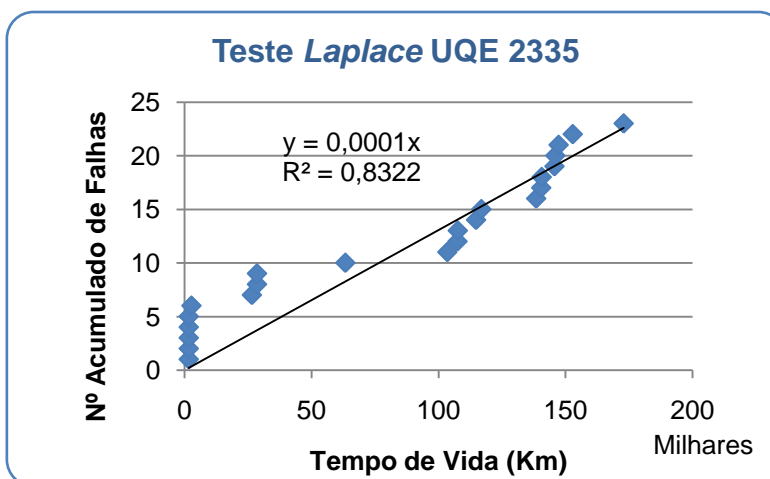


Figura A2.33 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2335.

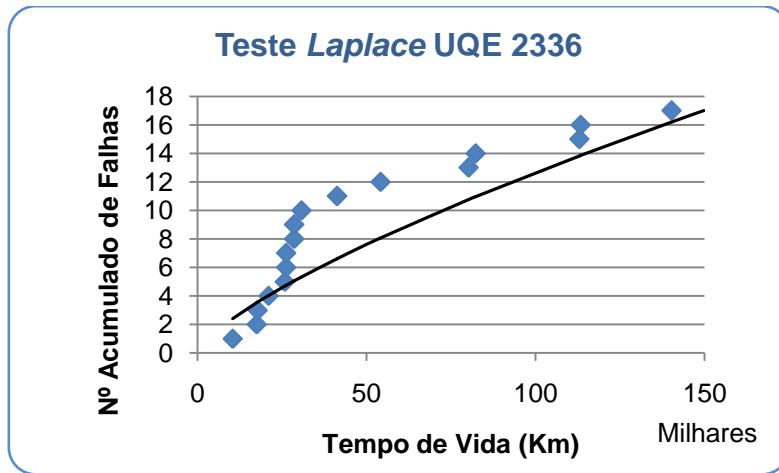


Figura A2.34 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2336.

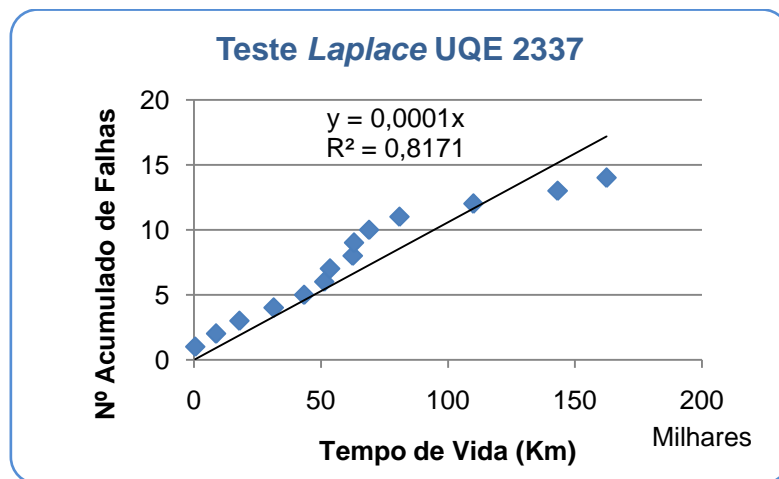


Figura A2.35 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2337.

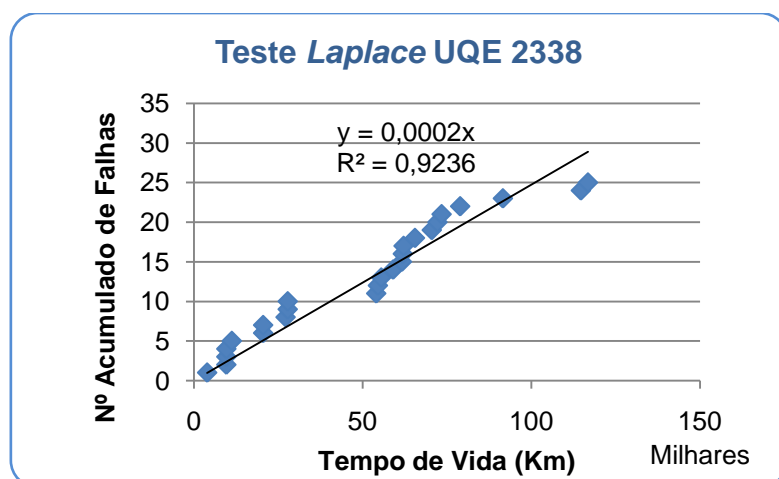


Figura A2.36 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2338.

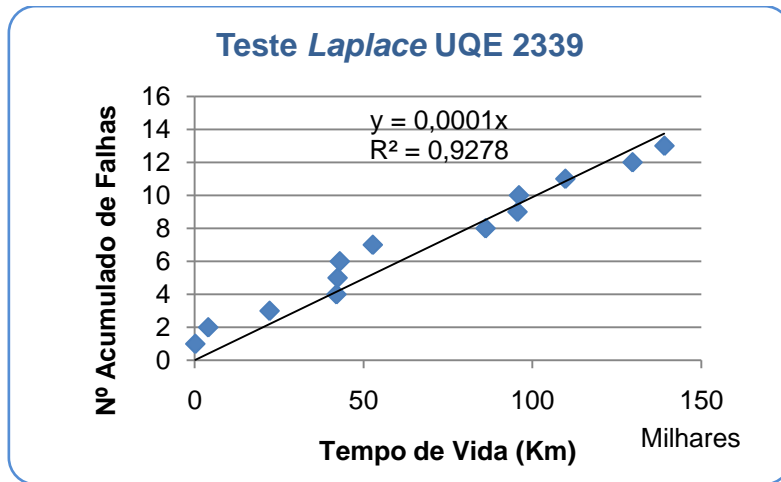


Figura A2.37 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2339.

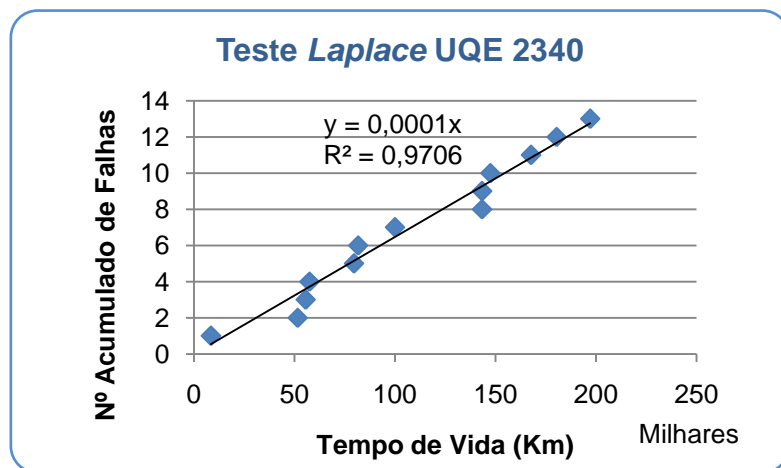


Figura A2.38 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2340.

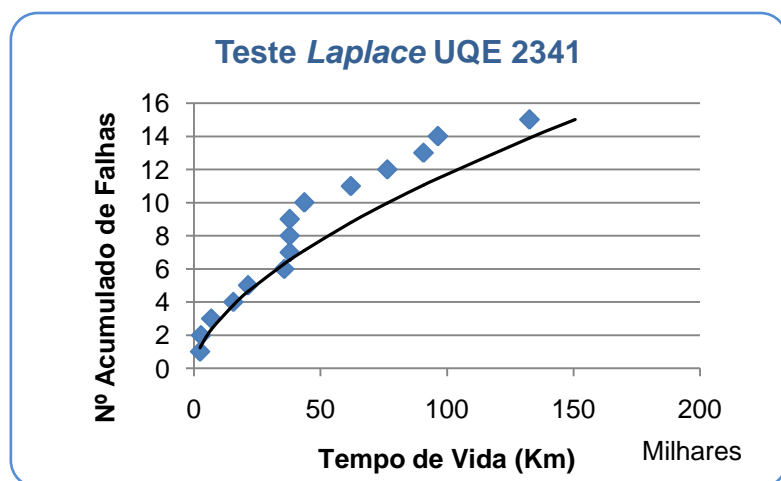
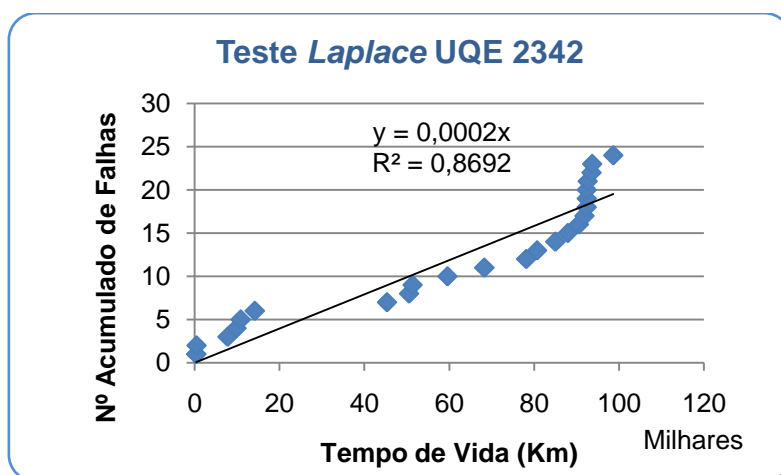


Figura A2.39 – Representação gráfica do teste de Laplace da UQE 2341.

Figura A2.40 – Representação gráfica do teste de *Laplace* da UQE 2342.

Apêndice A3 – Dados necessários à estimativa dos MTBF, MTBF mínimos garantidos e intervalos de confiança das automotoras.

Tabela A3.1 – Dados da UQE 2301 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2301			
$\hat{\beta}$	0,70	θ_S (Km)	16.991
$\hat{\lambda}$	0,005	Θ (Km)	10.821
ρ	$92,41 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	7.226

Tabela A3.2 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2302.

UQE 2302					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	263.131	9.746	α	0,10	7.527
n_f	27		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	69,92	

Tabela A3.3 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2304.

UQE 2304					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	260.829	7904	α	0,10	6.262
n_f	33		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	83,31	

Tabela A3.4 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2305.

UQE 2305					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	244.877	9.795	α	0,10	7.486
n_f	25		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	65,42	

Tabela A3.5 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2306.

UQE 2306					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	287.216	11.967	α	0,10	9.094
n_f	24		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	63,17	

Tabela A3.6 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2307.

UQE 2307					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	270.037	18.002	α	0,10	12.682
n_f	15		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	42,58	

Tabela A3.7 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2308.

UQE 2308					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	253.791	5.902	α	0,10	4.817
n_f	43		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	105,37	

Tabela A3.8 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2309.

UQE 2309					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	262.404	6.560	α	0,10	5.313
n_f	40		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	98,78	

Tabela A3.9 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2310.

UQE 2310					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	205.488	5.871	α	0,10	4.684
n_f	35		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	87,74	

Tabela A3.10 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2311.

UQE 2311					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	234.023	5.708	α	0,10	4.635
n_f	41		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	100,98	

Tabela A3.11 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2313.

UQE 2313					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	279.453	12.702	α	0,10	9.531
n_f	22		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	58,64	

Tabela A3.12 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2314.

UQE 2314					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	258.004	9.556	α	0,10	7.380
n_f	27		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	69,92	

Tabela A3.13 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2315.

UQE 2315					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	259.367	6.825	α	0,10	5.497
n_f	38		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	94,37	

Tabela A3.14 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2316.

UQE 2316					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	256.657	9.871	α	0,10	7.585
n_f	26		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	67,67	

Tabela A3.15 – Dados da UQE 2317 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2317			
$\hat{\beta}$	0,83	θ_S (Km)	14.422
$\hat{\lambda}$	0,001	Θ (Km)	7.011
ρ	$142,63 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	3.821

Tabela A3.16 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2318.

UQE 2318					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	260.253	7.886	α	0,10	6.248
n_f	33		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	83,31	

Tabela A3.17 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2319.

UQE 2319					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	279.185	12.138	α	0,10	9.168
n_f	23		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	60,91	

Tabela A3.18 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2320.

UQE 2320					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	223.063	5.441	α	0,10	4.418
n_f	41		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	100,98	

Tabela A3.19 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2321.

UQE 2321					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	257.841	13.571	α	0,10	9.954
n_f	19		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	51,81	

Tabela A3.20 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2322.

UQE 2322					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	240.464	11.451	α	0,10	8.532
n_f	21		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	56,37	

Tabela A3.21 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2323.

UQE 2323					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	271.329	19.381	α	0,10	13.480
n_f	14		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	40,26	

Tabela A3.22 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2324.

UQE 2324					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	209.059	7.743	α	0,10	5.980
n_f	27		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	69,92	

Tabela A3.23 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2325.

UQE 2325					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	261.141	10.044	α	0,10	7.718
n_f	26		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	67,67	

Tabela A3.24 – Dados da UQE 2326 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2326			
$\hat{\beta}$	0,68	θ_S (Km)	6.283
$\hat{\lambda}$	0,013	θ (Km)	3.177
ρ	$314,80 \times 10^{-5}$	θ_i (Km)	1.795

Tabela A3.25 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2327.

UQE 2327					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	270.677	11.769	α	0,10	8.888
n_f	23		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	60,91	

Tabela A3.26 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2328.

UQE 2328					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	262.772	6.915	α	0,10	5.569
n_f	38		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	94,37	

Tabela A3.27 – Dados da UQE 2329 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2329			
$\hat{\beta}$	0,78	θ_s (Km)	25.142
$\hat{\lambda}$	0,001	Θ (Km)	14.213
ρ	$70,36 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	8.712

Tabela A3.28 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2330.

UQE 2330					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	282.818	9.427	α	0,10	7.381
n_f	30		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	76,63	

Tabela A3.29 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2331.

UQE 2331					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	270.309	8.447	α	0,10	6.667
n_f	32		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	81,09	

Tabela A3.30 – Dados da UQE 2332 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2332			
$\hat{\beta}$	0,81	θ_S (Km)	17.573
$\hat{\lambda}$	0,001	Θ (Km)	9.934
ρ	$100,66 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	6.090

Tabela A3.31 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2333.

UQE 2333					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	257.461		α	0,10	
		10.728	$X^2_{\alpha, 2(n_f+1)}$	63,17	8.152
n_f	24				

Tabela A3.32 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2334.

UQE 2334					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	214.049		α	0,10	
		8.233	$X^2_{\alpha, 2(n_f+1)}$	67,67	6.326
n_f	26				

Tabela A3.33 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2335.

UQE 2335					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	182.883		α	0,10	
		7.951	$X^2_{\alpha, 2(n_f+1)}$	60,91	6.005
n_f	23				

Tabela A3.34 – Dados da UQE 2336 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2336			
$\hat{\beta}$	0,73	θ_S (Km)	23.774
$\hat{\lambda}$	0,003	Θ (Km)	6.791
ρ	$83,20 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	12.019

Tabela A3.35 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2337.

UQE 2337					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	170.924	12.209	α	0,10	8.492
n_f	14		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	40,26	

Tabela A3.36 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2338.

UQE 2338					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	122.961	4.918	α	0,10	3.759
n_f	25		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	65,42	

Tabela A3.37 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2339.

UQE 2339					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	147.922	11.379	α	0,10	7.803
n_f	13		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	37,92	

Tabela A3.38 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2340.

UQE 2340					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	212.101	16.315	α	0,10	11.188
n_f	13		$X^2_{\alpha,2(n_f+1)}$	37,92	

Tabela A3.39 – Dados da UQE 2341 necessários à estimativa do MTBF e respectivo intervalo de confiança.

UQE 2341			
$\hat{\beta}$	0,64	θ_S (Km)	35.950
$\hat{\lambda}$	0,008	Θ (Km)	16.698
ρ	$63,41 \times 10^{-6}$	θ_i (Km)	8.900

Tabela A3.40 – Dados necessários à estimativa do MTBF e MTBF mínimo garantido da UQE 2342.

UQE 2342					
MTBF (Km)			MTBF mínimo garantido (Km)		
T (Km)	109.099	4.546	α	0,10	3.454
n_f	24		$X^2_{\alpha, 2(n_f+1)}$	63,17	



Apêndice A4 – Gráfico da ocorrência das falhas da frota de UQE S2300.

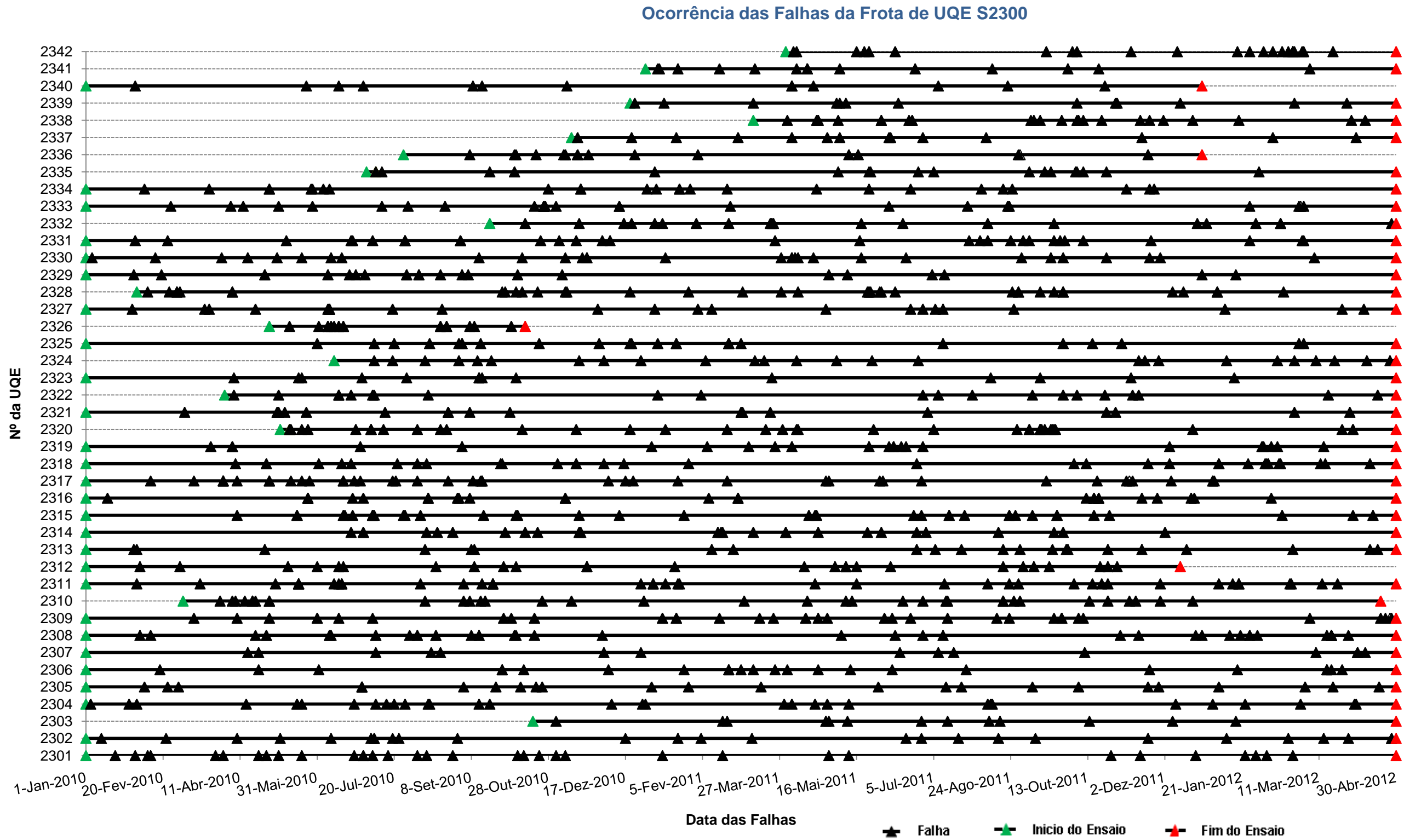


Figura A4.1 – Ocorrência das falhas da frota de UQE S2300.

Apêndice A5 – Tabelas e diagramas de Pareto dos sistemas e subsistemas da frota.

Tabela A5.1 – Número de falhas ocorridas por sistema e respectivo percentual acumulado.

Sistemas	Código	Nº Falhas	% Falha Sistema	Percentual Acumulado
Conversor de Tracção	CTR	236	32,87	32,87
Ar Condicionado dos Salões	CLS2300	166	23,12	55,99
Cabina de Condução	CDC	103	14,35	70,33
Portas Exteriores de Passageiros	PEP	97	13,51	83,84
Ar Condicionado da Cabina	CLS	59	8,22	92,06
Caixa do Veículo	CAI	24	3,34	95,40
Motor de Tracção	MTA	18	2,51	97,91
Engates	ENG	15	2,09	100
TOTAL		718		

Por observação da Tabela A5.1, conclui-se que os sistemas Conversor de Tracção, Ar Condicionado dos Salões e Cabina de Condução são os que mais significativamente contribuem para as falhas registadas, com 505 falhas (236+166+103), representando dessa forma cerca de 70% da totalidade das 718 falhas. Esta situação pode ser facilmente percebida pelo diagrama de Pareto representado na Figura A5.1.

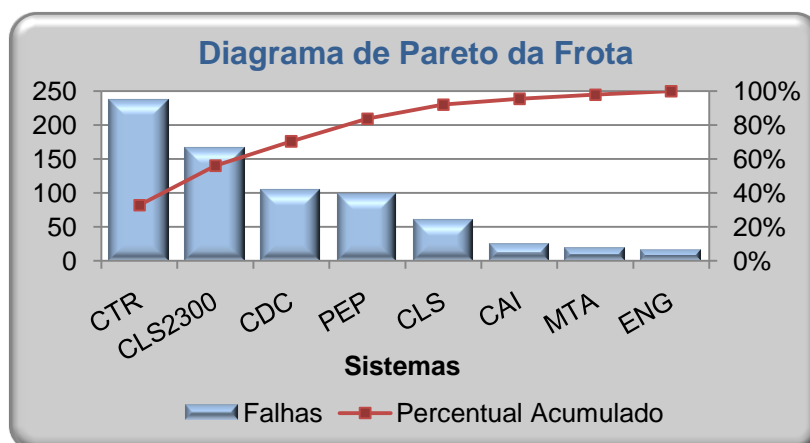


Figura A5.1 – Diagrama de Pareto dos sistemas pertencentes aos grupos de sistemas críticos da frota.

Uma vez conhecidos os sistemas críticos, sabe-se que os subsistemas que mais contribuem para a ocorrência das falhas estarão dentro destes. Nesse sentido, e tal como comprovado na Tabela A5.2, os subsistemas em questão referem-se ao Rectificador, Ondulador, Limpa vidros, Tubagem do gás refrigerante e Cartas da CLS, responsáveis por 75,25% das falhas ocorridas.

Tabela A5.2 – Número de falhas ocorridas por subsistema e respectivo percentual acumulado.

Subsistemas	Código	Nº Falhas	% Falha Subsistema	Percentual Acumulado
Rectificador	CTR03	156	30,89	30,89
Ondulador	CTR05	74	14,65	45,54
Limpa vidros	CDC04	70	13,86	59,41
Tubagem do gás refrigerante da CLS	CLS230030	41	8,12	67,52
Cartas da CLS	CLS230002	39	7,72	75,25
Motores da CLS	CLS230009	26	5,15	80,40
Porta da cabina	CDC01	15	2,97	83,37
Disjuntores da CLS	CLS230008	14	2,77	86,14
Transformadores da CLS	CLS230029	13	2,57	88,71
Espelhos	CDC03	11	2,18	90,89
Detector de tensão alterna de 380 V	CLS230007	8	1,58	92,48
Relés da CLS	CLS230022	7	1,39	93,86
Contactores da CLS	CLS230006	5	0,99	94,85
Fusíveis da CLS	CLS230012	4	0,79	95,64
Curto circuitador	CTR04	4	0,79	96,44
Monitor Sibas	CDC05	4	0,79	97,23
Conta-quilómetros	CDC06	3	0,59	97,82
Cablagem	CLS230035	2	0,40	98,22
Pressóstatos da CLS	CLS230021	2	0,40	98,61
Válvulas da CLS	CLS230031	2	0,40	99,01
Módulo KRIWAN	CLS230018	1	0,20	99,21
Compressores da CLS	CLS230003	1	0,20	99,41
Termóstatos da CLS	CLS230028	1	0,20	99,60
Circuito de entrada	CTR02	1	0,20	99,80
Ventilação	CTR06	1	0,20	100
TOTAL		505		

Para uma melhor percepção dos resultados alcançados, apresenta-se na Figura A5.2 o respectivo diagrama de Pareto, onde é possível comprovar o referido percentual acumulado associado aos 5 subsistemas com maior índice de falhas.

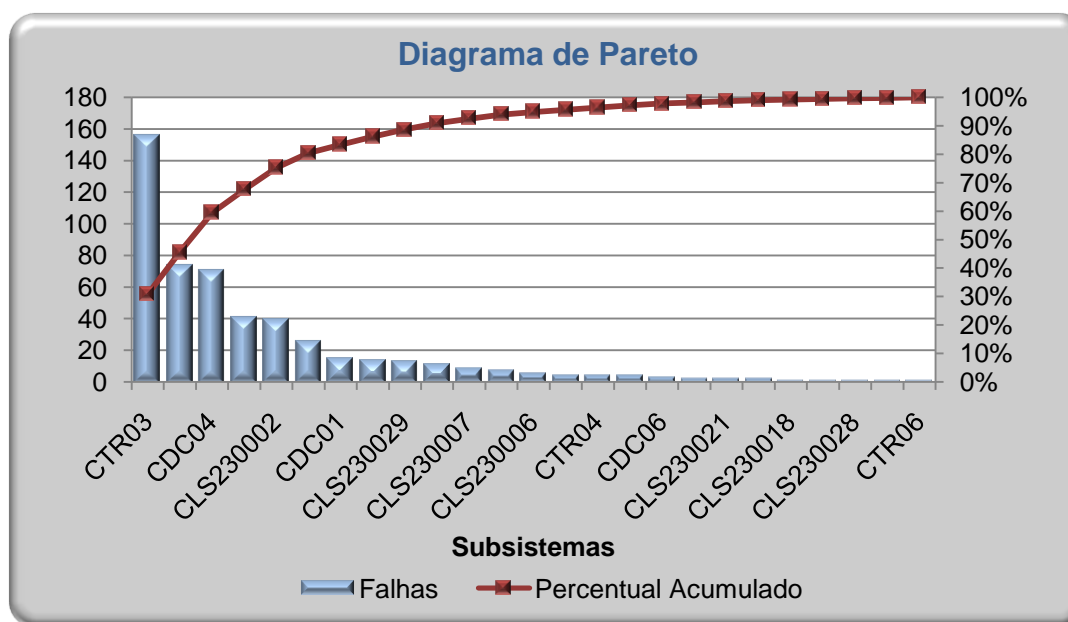


Figura A5.2 – Diagrama de Pareto dos subsistemas pertencentes aos sistemas críticos da frota.

Apêndice B1 – Tabela com tempos de vida considerados, não censurados, e tempos de vida excluídos (*outliers*) do LRU *Gate Unit*.

Tabela B1.1 – Tempos de vida não censurados com respectiva identificação dos excluídos (*outliers*) do LRU *Gate Unit*.

Tempos de Vida (Dias)									
0	34	105	214	326	431	497	630	809	2245
0	36	107	216	326	431	509	631	809	2261
1	42	113	221	327	434	522	638	809	2563
1	43	125	222	329	448	525	645	809	2565
2	43	126	222	335	452	526	655	809	2696
2	46	130	237	335	454	544	655	810	2913
3	47	132	245	336	456	544	670	816	3313
3	48	139	246	348	459	550	676	826	2767
3	49	143	251	349	460	552	689	882	3874
4	71	155	253	362	465	557	696	883	4094
5	72	160	266	368	465	558	697	917	4136
9	82	165	271	370	471	558	701	1331	4311
9	86	165	280	385	473	569	701	1347	4318
10	89	174	281	405	474	572	741	1379	4361
10	90	181	285	407	474	573	756	1481	
12	95	186	285	417	475	582	760	1518	
14	96	187	289	417	478	588	767	1717	
17	99	187	290	418	486	588	768	1722	
20	101	189	295	418	487	593	781	1735	
21	102	197	297	418	493	596	803	1957	
28	105	200	299	418	494	600	805	2004	
30	105	211	306	426	495	607	806	2169	

ANEXOS

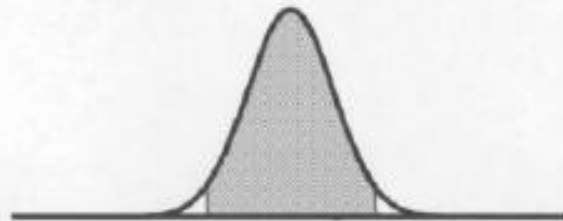
Anexo B – Tabela de constantes do Método de *Crow*.

Anexo C – Tabela da Distribuição Normal.

Anexo D – Sistema de Classificação de Avarias e Incidentes (SCAI).

Anexo B – Tabelas de constantes do Método de Crow.

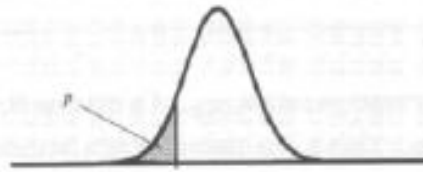
Modelo de Crow. Teste limitado por Tempo
(Intervalo de confiança)



n	CONFIDENCE COEFFICIENT							
	.90		.95		.99		.99	
	π_1	π_2	π_1	π_2	π_1	π_2	π_1	π_2
2	.261	16.655	.200	38.661	.153	76.604	.124	102.606
3	.333	6.326	.263	9.736	.217	14.552	.174	24.103
4	.385	4.243	.312	5.947	.262	8.093	.215	11.811
5	.426	3.336	.352	4.517	.300	5.662	.250	8.043
6	.459	2.915	.385	3.764	.331	4.738	.280	6.254
7	.487	2.616	.412	3.299	.358	4.031	.305	5.216
8	.511	2.407	.436	2.981	.382	3.609	.328	4.539
9	.531	2.254	.457	2.750	.403	3.285	.349	4.064
10	.549	2.138	.476	2.575	.421	3.042	.367	3.712
11	.565	2.041	.492	2.436	.438	2.852	.384	3.441
12	.579	1.965	.507	2.324	.453	2.699	.399	3.226
13	.592	1.901	.521	2.232	.467	2.574	.413	3.050
14	.604	1.846	.533	2.153	.480	2.469	.426	2.904
15	.614	1.800	.545	2.087	.492	2.379	.438	2.781
16	.624	1.759	.556	2.029	.503	2.302	.449	2.675
17	.633	1.723	.565	1.978	.513	2.235	.460	2.584
18	.642	1.692	.575	1.933	.523	2.176	.470	2.506
19	.650	1.663	.583	1.893	.532	2.123	.479	2.432
20	.657	1.638	.591	1.858	.540	2.076	.488	2.369
21	.664	1.615	.599	1.825	.548	2.031	.495	2.313
22	.670	1.594	.606	1.796	.556	1.985	.504	2.261
23	.676	1.574	.613	1.769	.563	1.941	.511	2.215
24	.682	1.557	.619	1.745	.570	1.929	.518	2.173
25	.687	1.540	.625	1.722	.576	1.900	.525	2.134
26	.692	1.525	.631	1.701	.582	1.873	.531	2.098
27	.697	1.511	.636	1.682	.588	1.848	.537	2.066
28	.702	1.499	.641	1.664	.594	1.825	.543	2.035
29	.706	1.486	.646	1.647	.599	1.803	.549	2.006
30	.711	1.475	.651	1.631	.604	1.783	.554	1.980
35	.723	1.427	.672	1.565	.627	1.699	.579	1.870
40	.745	1.390	.690	1.515	.646	1.635	.599	1.788
45	.758	1.361	.705	1.476	.662	1.585	.617	1.723
50	.769	1.337	.718	1.443	.676	1.544	.632	1.671
60	.787	1.300	.739	1.393	.700	1.481	.657	1.591
70	.801	1.272	.755	1.355	.718	1.435	.676	1.533
80	.813	1.251	.769	1.328	.734	1.399	.695	1.488
100	.831	1.219	.791	1.286	.758	1.347	.722	1.423

Modelo de Crow. Teste limitado por Avarias

(Nível de significância - p)



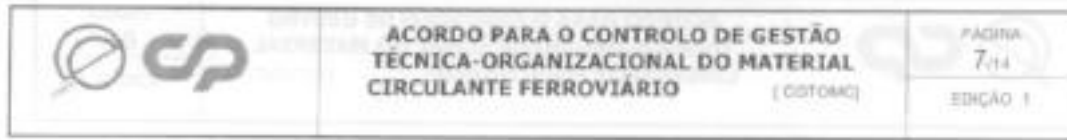
$\frac{z}{p}$.005	.010	.025	.050	.100	.900	.950	.975	.990	.995
2	.2373	.2944	.4059	.5552	.8065	33.76	72.67	151.5	309.9	783.6
3	.2627	.3119	.4051	.5137	.6940	8.927	14.24	21.96	37.00	55.52
4	.2902	.3363	.4225	.5174	.6601	5.328	7.651	10.65	15.55	21.31
5	.3151	.3603	.4415	.5220	.6563	4.000	5.424	7.147	9.995	12.63
6	.3372	.3815	.4595	.5421	.6600	3.321	4.339	5.521	7.353	9.076
7	.3563	.4003	.4700	.5548	.6555	2.910	3.702	4.555	5.993	7.162
8	.3746	.4173	.4910	.5668	.6720	2.534	3.284	4.032	5.071	5.993
9	.3909	.4327	.5040	.5780	.6787	2.195	2.999	3.593	4.469	5.211
10	.4052	.4467	.5171	.5893	.6852	1.897	2.770	3.255	4.032	4.652
11	.4185	.4595	.5285	.5979	.6915	1.617	2.600	3.051	3.702	4.233
12	.4309	.4712	.5391	.6037	.6975	1.353	2.464	2.870	3.443	3.909
13	.4422	.4823	.5498	.6150	.7033	1.103	2.353	2.721	3.235	3.650
14	.4523	.4923	.5570	.6227	.7097	0.864	2.260	2.597	3.054	3.433
15	.4622	.5017	.5664	.6320	.7159	0.635	2.182	2.481	2.921	3.262
16	.4719	.5106	.5743	.6397	.7218	0.416	2.114	2.404	2.800	3.113
17	.4813	.5193	.5818	.6481	.7274	0.207	2.055	2.327	2.685	2.965
18	.4905	.5277	.5893	.6561	.7328	0.000	2.004	2.259	2.604	2.871
19	.4995	.5374	.5954	.6637	.7379		1.959	2.200	2.524	2.777
20	.5083	.5471	.6016	.6701	.7428		1.919	2.147	2.453	2.691
21	.5169	.5478	.6076	.6752	.7474		1.881	2.099	2.390	2.614
22	.5253	.5574	.6132	.6791	.7518		1.843	2.055	2.333	2.546
23	.5335	.5661	.6186	.6827	.7560		1.808	2.017	2.281	2.484
24	.5415	.5739	.6237	.6861	.7599		1.774	1.982	2.235	2.428
25	.5493	.5814	.6286	.6893	.7637		1.741	1.949	2.192	2.377
30	.5636	.5957	.6433	.6973	.7705		1.672	1.913	2.153	2.330
35	.5779	.6097	.6478	.7049	.7764		1.608	1.879	2.116	2.287
40	.5920	.6235	.6520	.7121	.7814		1.549	1.846	2.083	2.247
45	.6059	.6361	.6595	.7189	.7856		1.494	1.814	2.052	2.211
50	.6195	.6493	.6630	.7253	.7891		1.442	1.782	2.023	2.176
60	.6453	.6783	.6820	.7313	.7929		1.392	1.750	1.995	2.036
70	.6723	.7050	.7087	.7370	.7961		1.344	1.718	1.967	2.000
80	.6997	.7318	.7354	.7423	.7988		1.300	1.686	1.940	1.964
100	.7142	.7384	.7419	.7470	.8000		1.265	1.655	1.913	1.928

Anexo C – Tabela da Distribuição Normal.

DISTRIBUIÇÃO NORMAL PONTOS PERCENTUAIS										
Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-4,1	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998	0,99999	0,99999
-4,0	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998
-3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997
-3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
-3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992
-3,6	0,99984	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989
-3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
-3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
-3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
-3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
-3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
-3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900
-2,9	0,99813	0,99817	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
-2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
-2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
-2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
-2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
-2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
-2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
-2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
-2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
-2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
-1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
-1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
-1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
-1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
-1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
-1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
-1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
-1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
-1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
-1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
-0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
-0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
-0,7	0,7589	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7822	0,7852
-0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
-0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
-0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
-0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
-0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
-0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359

$$S(x) = 1 - F(x) = P(X > x)$$


Anexo D – Sistema de Classificação de Avarias e Incidentes (SCAI).



ANEXO 1

Critérios para Classificação de Incidentes

DATA	ELABORADO	VERIFICADO	APROVADO
21.12.2019	 	 	

	ACORDO PARA O CONTROLO DE GESTÃO TÉCNICA-ORGANIZACIONAL DO MATERIAL CIRCULANTE FERROVIÁRIO [COTOMC]	PÁGINA
		8 ¹¹³ EDIÇÃO 1

Definição de Incidente:

Incidente: qualquer ocorrência que implique socorro, supressão ou atraso da circulação, à partida, em qualquer ponto do percurso, ou à chegada: superior a 5 minutos em circulações urbanas; 10 minutos nas restantes circulações de passageiros e 30 minutos em circulações de mercadorias. Classifica-se ainda como incidente qualquer ocorrência, nas marchas associadas às circulações, que implique socorro, supressão, ou atraso à partida da circulação a que esteja associada.

CHAVE XYZ

Incidente do tipo X: incidente para o qual não foi possível confirmar a causa primária.

Incidente do tipo Y: incidente cuja causa primária não é atribuível a insuficiente desempenho do material circulante.

Incidente do tipo Z: incidente cuja causa primária é atribuível a insuficiente desempenho do material circulante.

O primeiro carácter da chave define a classe da ocorrência ou da avaria.

O conjunto dos primeiros dois caracteres define a sub classe ocorrência ou da avaria.

INCIDENTES DA CLASSE 'X'

Devem ser classificados nesta classe todos as ocorrências em que não se confirme ter havido qualquer tipo de incidente.

Dentro da classe 'X' deve ser classificado como:

X11 - Quando a Unidade for inspeccionada numa oficina de Manutenção, ou equivalente, e não se detecte qualquer avaria, sem prejuízo de posteriormente este ser reavaliado, se houver motivo para tal, e reclassificado noutra das classes, nomeadamente "Z" se for confirmada a existência de avaria.

X12 - Quando a Unidade não for inspeccionada nem reparada por uma oficina de Manutenção, continuando a prestar serviço sem restrições, por ter normalizado.

INCIDENTES DA CLASSE 'Y'


Devem ser classificados nesta classe todos as ocorrências em que se confirme ter havido avaria mas esta não seja imputável ao Material Circulante.

Dentro da classe 'Y' deve ser classificado como:

Y1 - UTILIZAÇÃO DEFICIENTE

Y11 - Carga excessiva. Recusa de carga por tonelagem rebocada superior ao estipulado na Tabela de Carga ou documento regulamentar.

DATA	ELABORADO	VERIFICADO	APROVADO
21/12/2009	 	 	 

	ACORDO PARA O CONTROLO DE GESTÃO TÉCNICA-ORGANIZACIONAL DO MATERIAL CIRCULANTE FERROVIÁRIO (DOTOMC)	PÁGINA 9/14
		EDIÇÃO 1

Y12 – Utilização indevida pela exploração de veículos não disponíveis. Nomeadamente unidades paradas ou em trânsito para a Oficina de manutenção, por avaria, que são repescadas para o serviço comercial.

Y13 – A exploração não envia a unidade à Oficina de Manutenção quando esta apresenta deficiências impeditivas de prestar o seu normal funcionamento. A unidade não está totalmente operacional e como tal continua a provocar ocorrências.

Y14 – A exploração não envia a unidade na data programada para manutenção preventiva.

Y15 – Avarias provocadas por actuação deficiente do agente de condução, nomeadamente:

- Falsa manobra
- Sair fora de catenária
- Paragem em zona neutra
- Acoplamento executado incorrectamente
- Ensaio de freio mal executado

Y16 – Não reabastecimento atempado de combustível, nomeadamente Água, Areia, Óleo, etc.

Y17 – Avaria em linha cuja classificação como incidente se deve exclusivamente a deficiente actuação do maquinista revisor ou condutor em a resolver em tempo considerado aceitável, isto é: existiu a avaria mas não se justificou o incidente porquanto no manual de condução da UM estão expostas as orientações necessárias e suficientes para normalizar a situação, nomeadamente nos seguintes casos como:

- Substituir um fusível.
- Rearmar um disjuntor.
- Substituir uma lâmpada (se acessível).
- Utilizar o freio de recurso.
- Isolar equipamento defeituoso.

Y19 – Outras causas de utilização deficiente

Y2 – INSTALAÇÕES FIXAS DEFICIENTES

Y21 – Avarias provocadas no Material Circulante por instalações ou equipamentos deficientes da, nomeadamente Via e Catenária.

Y3 – AVARIAS PROVOCADAS POR TERCEIROS


Y31 – Colisão com:
Veículos motorizados ou rebocados.
Veículos de tração animal.

Y32 – Sabotagem. Vandalismo. Apedrejamento

Y33 – Colhida de animais

Y35 – Choque com objectos caídos na via ou catenária, nomeadamente:

DATA	ELABORADO	VERIFICADO	APROVADO
26.11.2001	 	 	 

	ACORDO PARA O CONTROLO DE GESTÃO TÉCNICA-ORGANIZACIONAL DO MATERIAL CIRCULANTE FERROVIÁRIO [ODTOMC]	PÁGINA 10 ¹¹⁴
		EDIÇÃO 1

Ferramentas
Árvores
Outros objectos

Y39 – Outras avarias provocadas por pessoas no material.

Y4 – AVARIAS PROVOCADAS POR CAUSAS NATURAIS OU FORTUITAS.

Y41 – Avarias devidas a:

Inundações.
Desprendimentos de terras.
Incêndios junto à linha.
Tremores de terra.

Y5 – AVARIAS POR DESCARRILAMENTOS OU COLISÕES COM COMBOIOS

Y51 – Descarrilamentos

Y52 – Colisões de comboios

INCIDENTES DA CLASSE 'Z'

Z1 – MANUTENÇÃO DEFICIENTE

Z11 – Avaria devida à falta (falha) de manutenção preventiva.

Z12 – Acção de manutenção executada incorrectamente, nomeadamente:

Actuação incorrecta do executante.
Procedimentos incorrectos.
Falta de formação.

Z13 – Utilização de material inadequado.


Z2 – REPARAÇÃO DEFICIENTE

Z21 – Peça de parque deficiente.

Z22 – Equipamento deficiente.

Z23 – Utilização de material inadequado.

DATA	ELABORADO	VERIFICADO	APROVADO
2012.08.07			

	ACORDO PARA O CONTROLO DE GESTÃO TÉCNICA-ORGANIZACIONAL DO MATERIAL CIRCULANTE FERROVIÁRIO [COTOMC]	PÁGINA 11/14
		EDIÇÃO 1

Z3 – MATERIAL COM COMPORTAMENTO DEFICIENTE

Z31 – Defeito de origem, nomeadamente devido a erro de concepção ou de projecto e que induz comportamento deficiente no Material Circulante.

Z32 – Fadiga / Envelhecimento. Falha devida à fadiga ou ao envelhecimento do material, sem estar prevista a sua substituição ou retirada de serviço.

Z33 – Causa indeterminada. Não se consegue apurar uma causa que justifique a falha do material.

Z4 – AVARIAS POR FALTA DE EQUIPAMENTOS OU MATERIAIS SOBRESSELENTES

Z41 – Equipamento com potencial de vida excedido. Avaria de um Rotável após ter excedido o seu potencial de vida, por não ter sido retirado atempadamente devido à inexistência em parque ou armazém.

Z42 – Componente não substituído. Avaria de um componente por não ter sido substituído atempadamente devido à inexistência de sobresselentes.

Z5 – AVARIA INDUZIDA OU EM CADEIA

Z51 – Avaria de um equipamento originado pela avaria de outro.

DATA	ELABORADO	VERIFICADO	APROVADO
27.12.2005			