



**Íris Soraia Cristóvão Dias**

Licenciada em Engenharia e Gestão Industrial

**Aplicação de Técnicas de Fiabilidade e  
Gestão de Manutenção numa Linha de  
Tratamento de Frigoríficos em Fim de Vida:  
Caso de Estudo Recielectric**

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

Orientador: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss  
Navas, Professora Auxiliar, FCT-UNL



**Aplicação de Técnicas de Fiabilidade e Gestão de Manutenção numa Linha de Tratamento de Frigoríficos em Fim de Vida: Caso de Estudo Recielectric**

*Copyright* © Íris Soraia Cristóvão Dias, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologias 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 em 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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar queria agradecer a orientação dada pela Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas, pela dedicação, enorme disponibilidade e orientação prestada durante toda a elaboração desta dissertação.

À empresa Recielectric pela oportunidade de participar neste projeto, permitindo-me desenvolver aptidões e dando-me uma primeira perspectiva do trabalho realizado em ambiente industrial. Um especial agradecimento ao Engenheiro Aranda pelo auxílio prestado, pelas sugestões dadas, e por toda a informação e conhecimento que me proporcionou adquirir. É certamente fulcral frisar a flexibilidade e disponibilidade que sempre mostraram em me receber e orientar.

À Engenheira Cláudia e à Engenheira Susana pelo apoio e pela disponibilização, sempre tão imediata, de toda a informação por mim requerida.

À minha família, em especial aos meus avós, por me guiarem desde sempre e pelo amor incondicional que dedicaram à minha vida, fazendo do sucesso desta objetivo das suas, sem eles nada disto seria possível. Ao meu tio que se encheria de orgulho perante este conjunto de folhas. Obrigado pelo amor dedicado, pelos ensinamentos e pelo caminho juntos. A vós dedico esta dissertação.

Aos meus colegas, hoje orgulhosamente amigos, Bruno e Cátia, pela amizade, pela ajuda sempre prestada e pela dedicação. Obrigado por constituírem desde que iniciei esta fase, o meu apoio, o meu equilíbrio. Obrigado por me ajudarem a chegar mais longe e ser melhor.

Aos meus amigos, em especial à Sandra, Catarina e Pedro, pelo apoio, pela paciência nos momentos mais difíceis, por todos os conselhos, pelo vosso tempo dedicado a mim, por acreditarem que sou capaz. Obrigado por me acompanharem neste caminho, nem sempre fácil, não só durante esta fase mas ao longo de toda a minha vida.

Ao meu namorado pelo tempo roubado.

Por último mas de forma alguma menos relevante, à minha sobrinha Bianca por ser fonte de inspiração e me mostrar que o pouco que me falta não é nada comparado com a felicidade de tudo o que tenho e posso vir a ter.

Passados estes anos é importante referir que não subi estas escadas sozinha!

Um enorme agradecimento a todos vocês!



## RESUMO

---

Atualmente vivemos numa sociedade moderna de excessivo consumo e rápido desenvolvimento tecnológico, formulado para saciar as nossas necessidades cada vez maiores e mais exigentes. A produção de equipamentos é por isto cada vez maior e mais diversificada, e o seu descarte, conseqüentemente fácil. Este fenómeno leva à acumulação crescente de resíduos, que sem o tratamento adequado têm como destino lixeiras e aterros, com as conseqüentes implicações a nível ambiental e económico.

Esta dissertação foi desenvolvida na empresa Recielectric, empresa da AMBIGROUP SGPS, S.A. responsável pelo tratamento de 20% dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE) produzidos em Portugal. Foi estabelecida uma parceria com a empresa que proporcionou a possibilidade de estágio com foco na linha 3 responsável pelo tratamento de frigoríficos em fim de vida.

Este trabalho teve como objetivo a análise pormenorizada das atividades e técnicas de gestão existentes inicialmente na linha de produção. Foi feita uma avaliação do comportamento do sistema linha 3 assim como dos seus equipamentos mais críticos, em termos da sua fiabilidade, manutibilidade e disponibilidade. Foram identificados problemas na linha em análise e elaboradas propostas de melhoria que visaram aumentar a eficiência e a eficácia das atividades, melhorando também os índices de desempenho destas

De entre o conjunto de propostas feitas, algumas já foram implementadas e encontram-se em teste, outras poderão ser implementadas a um curto prazo e outras futuramente implementadas.

**Palavras-Chave:** REEE, Atividades, Melhoria, Fiabilidade, Manutibilidade, Disponibilidade



## ABSTRACT

---

Nowadays we live in a modern society with an abusive and quick technologic development, which was created to please our high standardized needs. For this reason, the production of equipment is more diversified with an easy discard. The phenomenon leads to a constant increase of waste that without a proper treatment has landfills and dumps as destination. This reality has economic and environmental issues.

This dissertation was made in a company called Recielectric which belongs to AMBIGROUP SGPS, S.A. This group is responsible for the treatment of 20% of the e-waste produced in Portugal. It was established a partnership between both parts through an internship focusing the study old fridges at their ending state of live.

This work has as its main aim the rigorous analysis of the activities and management techniques used at the beginning of the production line. It was made an evaluation of the system 3 behavior and all its critical equipment using their reliability, viability and maintainability. It was identified problems at the analyzed line and it was provided some suggestions for improvement that aim to increase the activities efficiency and effectiveness. Using this suggestion is also expected to improve their performance indexes.

Between the suggestions proposed, some of them are fully implemented or in test phase and others could be implemented in short time period or in a near future.

**Keywords:** REEE, Activities, Improvement, Reliability, Viability, Maintainability



# ÍNDICE

---

<b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....	1
1.1. Enquadramento e objetivos da dissertação .....	1
1.2. Metodologia .....	2
<b>Capítulo 2 – Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos</b> .....	5
2.1. Introdução aos REEE .....	5
2.1.1. Definição .....	5
2.1.2. Características inerentes aos REEE .....	6
2.2. Dados estatísticos relativos aos REEE .....	7
2.2.1. Os REEE no mundo .....	7
2.2.2. REEE em Portugal e na Europa .....	8
2.3. Enquadramento legal .....	11
2.4. Principais agentes envolvidos na gestão de REEE a nível nacional .....	13
<b>Capítulo 3 – Fundamentos teóricos: Manutenção</b> .....	15
3.1. Evolução da Manutenção .....	15
3.2. Definição de Manutenção .....	17
3.3. Tipos de manutenção .....	19
3.3.1. Manutenção corretiva .....	21
3.3.2. Manutenção preventiva .....	22
3.4. Conceito de aptidão geral .....	27
3.5. Gestão da manutenção .....	28
3.6. Modelos de gestão da manutenção .....	29
3.6.1. Manutenção Centrada na Fiabilidade ( <i>Reliability Centered Maintenance</i> – RCM) .....	29
3.6.2. Manutenção produtiva total ( <i>Total Productive Maintenance</i> – TPM) .....	30
3.7. Indicadores de desempenho da manutenção: .....	36
3.7.1. Fiabilidade .....	36
3.7.2. Manutibilidade .....	38
3.7.3. Disponibilidade .....	40
<b>Capítulo 4 - Estatística de falhas</b> .....	43
4.1. Sistemas reparáveis versus sistemas não reparáveis .....	43
4.2. Dados censurados .....	44
4.3. Indicadores de desempenho da fiabilidade .....	45
4.3.1. Função fiabilidade ou sobrevivência .....	45
4.3.2. Função de risco .....	46
4.4. Estimador não paramétrico da função fiabilidade .....	47
4.5. Análise de tendência .....	48
4.5.1. Teste de Laplace .....	48

4.5.2. Processos Estocásticos Pontuais.....	49
4.6. Modelo de Crow .....	50
4.7. Distribuição Weibull .....	52
4.7.1. Função densidade de probabilidade .....	52
4.7.2. Função fiabilidade .....	53
4.7.3. Função de risco .....	53
<b>Capítulo 5 – Apresentação da empresa .....</b>	<b>55</b>
5.1. Recielectric .....	56
5.2. Linha de produção 3.....	59
5.2.1. <i>Layout</i> da linha 3 .....	60
5.2.2. Descrição do processo .....	61
5.2.3. Atividades típicas de manutenção desenvolvidas na linha 3 .....	67
<b>Capítulo 6 - Caso de estudo: Sistema reparável linha 3 .....</b>	<b>69</b>
6.1. Análise da interrupções verificadas na linha 3.....	69
6.1.1. Cálculo de tempos de paragem.....	71
6.1.2. Cálculo de indicadores de desempenho .....	73
6.1.3. Cálculo do rendimento operacional por tempos.....	76
6.2. Análise de fiabilidade do sistema reparável.....	77
6.2.1. Identificação das causas passíveis de provocar problemas no sistema .....	77
6.2.2. Análise de tendência do sistema reparável.....	80
6.2.3. Análise individual a cada equipamento .....	82
6.2.4. Sistema reparável com fiabilidade crescente.....	84
6.2.5. Sistemas reparáveis com taxas de falhas constantes .....	88
6.2.6. Sistema reparável com taxa de falhas crescente.....	90
6.3. Propostas às principais causas de paragem da linha 3.....	93
6.3.1. Análise Silo.....	93
6.3.2. Análise da Peletizadora.....	96
<b>Capítulo 7 – Conclusões finais .....</b>	<b>99</b>
Bibliografia .....	105

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 – Metodologia do trabalho.....	2
Figura 2.1 – Figura ilustrativa do descarte de REEE .....	5
Figura 2.2 – Quantidade de REEE mundialmente gerados .....	8
Figura 2.3 – Quantidades por habitante de REEE geradas na Europa em 2014 .....	9
Figura 2.4 – Colocação de EEE no mercado versus REEE recolhidos .....	9
Figura 2.5 - Gestão de REEE em Portugal no ano de 2013 .....	10
Figura 2.6 – Toneladas de EEE, por categoria, colocadas no mercado em Portugal .....	12
Figura 2.7 – Toneladas de REEE recolhidos em Portugal (APA, 2015) .....	13
Figura 2.8 – Missão contínua das entidades gestoras nacionais .....	14
Figura 3.1 – O crescimento das expetativas da manutenção .....	16
Figura 3.2 – Síntese da aplicação das metodologias de manutenção .....	17
Figura 3.3 – Comparação da saúde humana com a saúde das máquinas .....	18
Figura 3.4 – Diferentes formas de manutenção segundo Pinto .....	20
Figura 3.5 – Diferentes formas de manutenção segundo norma NP EN 13306 2007 .....	20
Figura 3.6 – Diferentes formas de manutenção segundo Brito.....	21
Figura 3.7 – Representação da manutenção do tipo corretiva .....	21
Figura 3.8 – Fiabilidade de um sistema submetido a manutenção preventiva .....	23
Figura 3.9 – Representação da manutenção do tipo preventiva sistemática .....	24
Figura 3.10 – Degradação de um componente sujeito a substituição preventiva .....	25
Figura 3.11 – Representação da manutenção do tipo preventiva condicionada .....	26
Figura 3.12 – Conceito de aptidão geral .....	27
Figura 3.13 – Os oito pilares da TPM.....	32
Figura 3.14 – Decomposição dos tempos de estado de um equipamento .....	34
Figura 3.15 – Padrão de falhas ou “curva da banheira” .....	38
Figura 3.16 – Indicadores MTTR, MTBF, MDT e MUT .....	40
Figura 3.17 – Relação fiabilidade, manutibilidade e a disponibilidade .....	41
Figura 4.1 – Dados censurados .....	45
Figura 4.2 - Distribuição normal reduzida .....	49

Figura 4.3 – Função de probabilidade acumulada de Weibull para vários valores de $\beta$ .....	53
Figura 4.4 - Evolução esperada de $h(t)$ de um componente substituído preventivamente .....	54
Figura 5.1 – Estrutura da AMBIGROUP em Portugal .....	55
Figura 5.2 - Recielectric.....	56
Figura 5.3 - Distribuição por categorias de EEE recebidos na Recielectric.....	57
Figura 5.4 – Frações resultantes dos grandes eletrodomésticos .....	58
Figura 5.5 – Frações resultantes dos equipamentos de refrigeração.....	58
Figura 5.6 – Frações resultantes de monitores e televisores .....	59
Figura 5.7 – Representação da linha 3 em funcionamento .....	60
Figura 5.8 – <i>Layout</i> da linha 3.....	60
Figura 5.9 – Principais processos envolvidos no tratamento dos equipamentos de frio .....	62
Figura 5.10 – Representação da zona de alimentação da linha 3.....	63
Figura 5.11 – Zona de separação e Silo de espuma .....	64
Figura 5.12 – Saídas de material (produtos finais) .....	64
Figura 5.13 - Peletizadora .....	65
Figura 5.14 – Produto final da peletização (peletes).....	65
Figura 5.15 – Sistemas de crio condensação do tipo Duo-Condex.....	66
Figura 6.1 – Pesos de cada tempo de estado da linha em relação ao tempo total .....	72
Figura 6.2 – Pesos de cada tempo de estado em relação ao tempo requerido .....	73
Figura 6.3 – Diagrama de Pareto do número de falhas por equipamento.....	79
Figura 6.4 – Diagrama de Pareto do tempo de paragem por equipamento em falha .....	79
Figura 6.5 – Número acumulado de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento de ocorrência da falha .....	80
Figura 6.6 – Representação gráfica da ocorrência de falhas nos equipamentos críticos .....	83
Figura 6.7 – Taxa de avarias da Peletizadora em função do tempo de vida.....	85
Figura 6.8 – Função acumulada de probabilidade da Peletizadora.....	87
Figura 6.9 – Fiabilidade do equipamento Peletizadora.....	87
Figura 6.10 – Fiabilidade dos equipamentos Duocondex e Granulador.....	89
Figura 6.11 - Taxa de avarias do Silo em função do tempo de vida.....	91
Figura 6.12 - Função acumulada de probabilidade do equipamento Silo.....	92

Figura 6.13 - Fiabilidade do equipamento Silo.....	93
Figura 6.14 – Representação do Silo e seus componentes .....	94
Figura 6.15 – Válvula rotativa eclusa utilizada no Silo pela Recielectric .....	95
Figura 6.16 – Peletizadora usada na Recielectric.....	96
Figura 6.17 – Peletizadora com encravamento .....	97
Figura 6.18 – Humidade presente no interior da parede de escoamento da Peletizadora .....	97
Figura 6.19 – Representação esquemática do sistema Silo e Peletizadora.....	98



## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1 – Quantidade de <i>e-waste</i> gerada a nível mundial por ano .....	7
Tabela 2.2 – Metas de recolha definidas pela diretiva europeia adotada em 2012 .....	11
Tabela 5.1 – Listagem dos principais equipamentos que compõe a linha 3 .....	61
Tabela 5.2 – Características dos gases mais comuns presentes no circuito de refrigeração .....	66
Tabela 5.3 – Características dos gases mais comuns presentes na espuma de isolamento .....	67
Tabela 6.1 – Intervenções por equipamento e respetiva duração em horas .....	70
Tabela 6.2 – Outras causas de paragem .....	71
Tabela 6.3 – Tempos de estado referentes aos vários meses do período em análise .....	72
Tabela 6.4 – Número de frigoríficos triturados por mês .....	74
Tabela 6.5 – Causas de paragens no sistema linha 3 .....	78
Tabela 6.6 – Contribuição relativamente a falhas dos equipamentos considerados críticos .....	80
Tabela 6.7 – Parâmetros necessários à aplicação do teste de <i>Laplace</i> efetuado ao sistema linha 3 .	81
Tabela 6.8 – Resultados do cálculo do MTBF do sistema linha 3 .....	81
Tabela 6.9 – Resultados do cálculo do tempo mínimo entre falhas ou MTBF mínimo.....	82
Tabela 6.10 – Quadro síntese do teste de Laplace para os vários equipamentos críticos .....	82
Tabela 6.11 – MTBF e MTBF mínimo calculados para os equipamentos Duocondex e Granulador ..	83
Tabela 6.12 – Estimativa do valor CMTBF e seus limites para a Peletizadora .....	84
Tabela 6.13 – <i>Summary Parameters</i> : parâmetros forma e escala da Peletizadora .....	86
Tabela 6.14 – Indicadores fiabilísticos calculados para os equipamentos Duocondex e Granulador..	88
Tabela 6.15 –Taxa de falhas calculada para os equipamentos Duocondex e Granulador .....	88
Tabela 6.16 – Causas de falha do equipamento Duocondex .....	89
Tabela 6.17 - Causas de falha do equipamento granulador .....	89
Tabela 6.18 – Estimativa do valor CMTBF e seus limites para o Silo .....	91
Tabela 6.19 – <i>Summary Parameters</i> : parâmetros forma e escala do equipamento Silo .....	92
Tabela 6.20 – Número de ocorrências e tempo de paragem em horas resultantes do Silo cheio .....	94
Tabela 6.21 – Causas de paragem do equipamento Peletizadora .....	96



## ABREVIATURAS

---

<b>Amb3E</b>	- Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
<b>ANREE</b>	- Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos
<b>APA</b>	- Agência Portuguesa do Ambiente
<b>CE</b>	- Comissão Europeia
<b>CEE</b>	- Comunidade Económica Europeia
<b>CFC</b>	- Cloro-Flúor-Carbono
<b>CMTBF</b>	- <i>Cumulative Mean Time Between Failures</i>
<b>EEE</b>	- Equipamentos de Resíduos Elétricos e Eletrónicos
<b>ERP</b>	- <i>European Recycling Platform</i>
<b>EU</b>	- <i>European Union</i>
<b>EUROSTAT</b>	- <i>European Statistics</i>
<b>FCT</b>	- Faculdade de Ciências e Tecnologias
<b>FMEA</b>	- <i>Failure Mode Effects and Analysis</i>
<b>FMECA</b>	- <i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis</i>
<b>GWP</b>	- <i>Global-Warming Potential</i>
<b>HC</b>	- Hidrocarboneto
<b>HCFC</b>	- Hidro-Cloro-Flúor-Carbono
<b>HFC</b>	- Hidro-Flúor-Carbono
<b>IID</b>	- Independente e Identicamente Distribuído
<b>ISO</b>	- <i>International Organization for Standardization</i>
<b>MDT</b>	- <i>Mean Down Time</i>
<b>MTBF</b>	- <i>Mean Time Between Failures</i>
<b>MTTR</b>	- <i>Mean Time To Repair</i>
<b>MUT</b>	- <i>Mean UP Time</i>
<b>NASA</b>	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<b>NP</b>	- Norma Portuguesa
<b>NPR</b>	- Número de peças realizadas
<b>ODS</b>	- <i>Ozone Depleting Substances</i>
<b>OEE</b>	- <i>Overall Equipment Efficiency</i>
<b>PH</b>	- Poisson Homogéneo
<b>PNH</b>	- Poisson Não Homogéneo
<b>PPH</b>	- Processo de Poisson Homogéneo
<b>PPNH</b>	- Processo de Poisson Não Homogéneo
<b>RCM</b>	- <i>Reliability Centered Maintenance</i>
<b>RE</b>	- Resíduos de Embalagem
<b>REEE</b>	- Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos

<b>NPB</b>	- Número de peças boas fabricadas
<b>NPR</b>	- Número de peças realizadas
<b>NPTR</b>	- Número de peças teoricamente realizáveis no tempo requerido
<b>ROCOF</b>	- <i>Rate of Occurrence of Failures</i>
<b>RP&amp;A</b>	- Resíduos de Pilhas e Acumuladores
<b>RPN</b>	- <i>Risk Priority Number</i>
<b>SCGR</b>	- Sistema Coletivo de Gestão de Resíduos
<b>SNR</b>	- Sistema Não Reparável
<b>SR</b>	- Sistema Reparável
<b>Tae</b>	- Tempo de paragem de exploração
<b>TAF</b>	- Tempos de paragem funcional
<b>TBF</b>	- Tempo de bom funcionamento
<b>TBF</b>	- <i>Time Between Failures</i>
<b>Td</b>	- Tempo potencial disponível
<b>TF</b>	- Tempo de funcionamento
<b>TFD</b>	- Tempo de funcionamento degradado
<b>Ti</b>	- Tempo de indisponível
<b>TNR</b>	- Tempo não requerido
<b>TPA</b>	- Tempo de paragem por avaria
<b>TPI</b>	- Tempo de paragens induzidas
<b>TPM</b>	- <i>Total Productive Maintenance</i>
<b>TPP</b>	- Tempo de paragens próprias
<b>TR</b>	- Tempo requerido
<b>TT</b>	- Tempo total
<b>TTR</b>	- <i>Time To Repair</i>
<b>UNL</b>	- Universidade Nova de Lisboa
<b>UNU</b>	- <i>United Nations University</i>
<b>UTV</b>	- Unidade de Tratamento e Valorização

## SIMBOLOGIA

---

<b>D</b>	- Disponibilidade
<b>D<sub>i</sub></b>	- Disponibilidade induzida
<b>D<sub>o</sub></b>	- Disponibilidade operacional
<b>D<sub>p</sub></b>	- Disponibilidade própria
<b>E[N(t)]</b>	- Número esperado de falhas
<b>f(t)</b>	- Função densidade de probabilidade de falha
<b>F(t)</b>	- Função de distribuição cumulativa
<b>h(t)</b>	- Função de risco
<b>H<sub>0</sub></b>	- Hipótese nula
<b>H<sub>1</sub></b>	- Hipótese alternativa
<b>L</b>	- Função de máxima verosimilhança
<b>n</b>	- Dimensão da amostra
<b>N</b>	- Número de avarias verificadas no período de tempo considerado
<b>N(t)</b>	- Número de falhas que ocorrem durante o intervalo [0, t]
<b>P<sub>o</sub></b>	- Produtividade
<b>R(t)</b>	- Função fiabilidade
<b><math>\hat{R}(t)</math></b>	- Estimador Kaplan-Meier
<b>R<sub>o</sub></b>	- Rendimento operacional
<b>R<sub>v</sub></b>	- Rendimento velocidade
<b>t</b>	- Tempo
<b>t<sub>0</sub></b>	- Parâmetro de localização da distribuição Weibull
<b>t<sub>jl</sub></b>	- Dados censurados conhecidos
<b>T</b>	- Tempo de observação do sistema (Período de ensaio)
<b>T<sub>cm</sub></b>	- Tempo de ciclo real médio
<b>T<sub>cth</sub></b>	- Tempo de ciclo teórico
<b>T<sub>nf</sub></b>	- Tempo de observação do sistema (teste limitado pelo número de falhas)
<b>T<sub>q</sub></b>	- Taxa de qualidade
<b>Z<sub>0</sub></b>	- Estatística teste
<b>β</b>	- Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
<b><math>\hat{\beta}</math></b>	- Estimativa da constante do modelo de Crow
<b>η</b>	- Parâmetro de escala da distribuição de Weibull
<b><math>\hat{\theta}</math></b>	- Estimativa do valor do tempo cumulativo médio entre falhas
<b><math>\hat{\theta}_i(\tau)</math></b>	- Limite inferior do tempo cumulativo entre falhas
<b>θ<sub>i</sub></b>	- MTBF mínimo

- $\hat{\theta}_s(\tau)$  - Limite superior do tempo cumulativo entre falhas
- $\lambda$  - Taxa de falhas
- $\hat{\lambda}$  - Estimativa da constante do modelo de Crow
- $\lambda(t)$  - Taxa de variação do número esperado de falhas
- $\mu$  - Taxa de reparação
- $\rho(\tau)$  - Taxa de falhas quando esta apresenta tendência (modelo de Crow)
- $\tau_0$  - Instante inicial
- $\tau_i$  - Idade do sistema no momento da falha  $i$
- $\chi^2$  - Distribuição Qui-Quadrado
- $\pi$  - Constante do modelo de Crow para cálculo dos limites inferior e superior

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

## 1.1. Enquadramento e objetivos da dissertação

A qualidade de qualquer serviço industrial encontrasse intimamente relacionada com o seu nível de produtividade. Para garantir esta produtividade temos de garantir que a disponibilidade de todos os equipamentos seja a maior possível.

Uma manutenção de qualidade é necessária para garantir valores satisfatórios, e aumentados desta disponibilidade operacional, conseguidos através do aumento do tempo médio entre intervenções de manutenção, e da diminuição do tempo médio de paragem. É evidente nos dias de hoje a importância para qualquer indústria de um plano de gestão da manutenção de qualidade superior.

A linha 3 é responsável pelo tratamento de frigoríficos em fim de vida. É nesta linha que se procede à trituração da carcaça dos frigoríficos, já pré-descontaminados, em ambiente controlado com injeção de azoto e é nela que se faz a separação mecânica das várias frações materiais (metais ferrosos, espuma de isolamento, plásticos e metais não ferrosos) que daí resultam.

A Recieletric prima pela aplicação das melhores práticas e uso de tecnologias avançadas e economicamente sustentáveis que assegurem a reutilização de resíduos e valorização destes para reciclagem de acordo com as normas legais em vigor. É fulcral uma gestão de resíduos de excelência, que reduza de forma significativa os seus impactos ambientais e o seu carácter nocivo, protegendo desta forma o ambiente e a saúde humana. Esta excelência só é conseguida melhorando de forma contínua as condições de funcionamento dos equipamentos envolvidos no processo, e acrescentando desta forma valor a este serviço.

A linha em causa é a mais crítica da empresa a nível de paragens que comprometem o seu bom funcionamento e por isso uma menor produção, uma maior exposição de agentes nocivos ao ambiente, nomeadamente quando a falha exija uma manutenção com abertura de zonas onde existem estes gases em circulação, e um maior tempo de inatividade e por isto menor rentabilidade.

Determinado o problema é então notória uma necessidade de melhoria, e foi feita a proposta por parte da empresa para melhorar a capacidade de produção desta linha, e aceite o desafio.

***“Success is 99% failure”***

Henry Ford

Os objetivos gerais em que se foca esta dissertação são a revisão completa do trabalho feito na linha de produção 3, o estudo e análise de históricos relativos às causas de paragens existentes que

provocam paragens totais da linha, durante o segundo semestre de 2014. A gravidade de determinado tipo de paragem, tanto em tempo despendido como em meios envolvidos para a cessar.

A existência de um histórico de falhas é essencial não só para a determinação de pontos considerados críticos, como para a tomada de algumas decisões importantes a nível económico. Até que ponto não compensará a substituição de determinada máquina se as sucessivas manutenções desta já não se considerarem económicas.

Algumas paragens exigem uma manutenção mais profunda, com exposição e abertura de zonas que podem levar à libertação de gases nocivos, uma das principais preocupações da Recielectric.

Pretende-se detetar as causas mais frequentes de falhas, e usar a manutenção de forma que a produção seja retomada o mais rapidamente possível, e que o tempo entre falhas seja máximo.

Desta forma, o cerne será aumentar o desempenho desta linha, otimizando a sua produção, e tornando-a o mais eficiente possível, através do planeamento de estratégias que reduzam a probabilidade de falha deste sistema com a aplicação de técnicas de gestão da manutenção e fiabilidade consideradas pertinentes.

## 1.2. Metodologia

A metodologia utilizada na realização deste trabalho é constituída, como representado na figura 1.1, por cinco fases distintas, nomeadamente, planeamento, revisão bibliográfica, criação de histórico de dados, análise de resultados e conclusões.



**Figura 1.1 – Metodologia do trabalho**

A primeira fase da metodologia utilizada neste trabalho consistiu no seu planeamento. Nesta fase foram definidos os objetivos a atingir assim como a melhor forma de os alcançar. Posteriormente foi fulcral uma revisão bibliográfica de todos os conceitos e temas necessários á elaboração do estudo a efetuar, nomeadamente sobre manutenção, gestão da manutenção e seus modelos, e indicadores de desempenho. Esta fase teve como objetivo a criação de alicerces que permitissem desenvolver todo o trabalho e análise efetuada.

Foi ainda feita nesta fase uma pesquisa sobre o fluxo de resíduos tratados pela empresa Recielectric, especificamente os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (REEE). Considerou-se importante a revisão de diretivas relativas a este tema, tanto para a definição de REEE como para frisar a importância do tratamento deste tipo de resíduos e realçar o interesse do trabalho desta empresa, e em especial da linha de tratamento em estudo. Foi ainda feita uma análise a nível estatístico, pretendendo caracterizar a gestão de REEE no mundo e em particular em Portugal.

Constituídas as bases procedeu-se à elaboração de um histórico de dados, representando este um arquivo cronologicamente ordenado, contendo todas as situações verificadas ao longo do dia de trabalho, assim como a hora a que se iniciam e findam, e que alteram o estado de funcionamento da linha. Este histórico foi elaborado durante o segundo semestre do ano de 2014.

A partir da informação contida no histórico de dados reais de tempos de paragens ordenados cronologicamente recolhido, foi possível a análise de resultados tendo em conta os métodos de avaliação previamente definidos e que melhor se adaptavam ao caso de estudo e às exigências da empresa quanto às conclusões que pretendiam retirar deste trabalho. Foram feitas propostas e retiradas conclusões.



# CAPÍTULO 2 – OS RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

---

## 2.1. Introdução aos REEE

### 2.1.1. Definição

A Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de Janeiro de 2003 relativa aos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) estabelece na alínea a) e b) do seu artigo 3º a seguinte definição de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) e Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos respetivamente (Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 2003):

*"Equipamentos Elétricos e Eletrônicos", ou "EEE", os equipamentos cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, pertencentes às categorias definidas no anexo I A e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1000 Volts para corrente alterna e 1500 Volts para corrente contínua;*

*"Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos" ou "REEE", os equipamentos elétricos ou eletrônicos que constituem resíduos, nos termos da alínea a) do artigo 1º da Diretiva 75/442/CEE, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte do produto no momento em que este é descartado;*

A figura 2.1 é ilustrativa do descarte de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos.



**Figura 2.1 – Figura ilustrativa do descarte de REEE**

Definem-se ainda, no anexo I A, da diretiva supracitada, as categorias de EEE, assim como a listagem em anexo I B de todos os produtos e funções agregados a cada uma destas dez categorias

legais de EEE. Seguidamente apresenta-se a listagem das 10 categorias de equipamentos elétricos e eletrónicos definidas na diretiva:

1. Grandes eletrodomésticos;
2. Pequenos eletrodomésticos;
3. Equipamentos informáticos e de telecomunicações;
4. Equipamentos de consumo;
5. Equipamentos de iluminação;
6. Ferramentas elétricas e eletrónicas (com exceção de ferramentas industriais fixas de grandes dimensões);
7. Brinquedos e equipamento de desporto e lazer;
8. Aparelhos médicos (com exceção de todos os produtos implantados e infetados);
9. Instrumentos de monitorização e controlo;
10. Distribuidores automáticos.

A Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (ANREE), fornece uma árvore de decisão geral relativamente aos EEE, que permite aos produtores deste tipo de equipamentos concluir se o equipamento em análise está ou não no âmbito do Decreto-Lei n.º 230/2004 de 10 de Dezembro, que transpõe a Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho 2002/96/CE, de 27 de Janeiro de 2003 supracitada.

### **2.1.2. Caraterísticas inerentes aos REEE**

Dentro da gama de resíduos existentes, os REEE caracterizam-se pelos desafios peculiares e complexos que trazem agregados a si. Os equipamentos elétricos e eletrónicos caracterizam-se pela sua grande heterogeneidade em termos de tamanho, peso, funcionalidades e composição.

Com o acelerado avanço tecnológico dos dias correntes, todos os anos são inseridos novos produtos no mercado por várias empresas com novas e distintas características mesmo dentro da mesma gama de produtos.

Muitos dos elementos que constituem os EEE são de difícil recuperação e requerem processos tecnológicos mais complexos que assegurem a sua reutilização e valorização para reciclagem. Os REEE são constituídos por uma complexa mistura de materiais e componentes, maioritariamente perigosos e tóxicos, podendo por isto culminar em problemas ambientais e para a saúde humana, possuem frequentemente na sua composição, certos elementos ou substâncias como CFC's (Cloro-Flúor-Carbono) destruidoras da camada do ozono, metais pesados, como o mercúrio, o cádmio e o chumbo. Estas substâncias, no fim de vida de cada EEE, devem ser geridas de forma a reduzir significativamente os seus impactos ambientais e o seu carácter nocivo, protegendo desta forma o ambiente e a saúde humana (Huisman, 2013).

São utilizados ainda recursos naturais raros como o ruténio, o índio e certos platinóides, considerados críticos pela sua grande procura, escassez geológica, e riscos associados á sua exploração só possível em específicas áreas geográficas (Huisman, 2013).

Segundo dados da Comissão Europeia muitos produtos eletrónicos modernos utilizam recursos escassos e dispendiosos como o ouro na sua produção. Cerca de 10% do ouro que mundialmente dispomos é utilizado para este fim (EUROSTAT, 2015).

O facto de possuírem na sua composição materiais com retorno monetário considerável como o cobre, ferro, alumínio e certos plásticos e metais preciosos como o ouro, anteriormente referido, a prata e a platina, torna a sua reciclagem extremamente importante (Huisman, 2013).

Têm então duas vertentes relevantes a salientar, a da toxicidade que torna necessária a adoção de políticas de manipulação adequadas de forma a proteger o ambiente e a saúde humana e a de constituírem uma mina urbana, pela exploração possível dos valiosos recursos secundários que daí possam provir (Huisman, 2013).

## 2.2. Dados estatísticos relativos aos REEE

### 2.2.1. Os REEE no mundo

O número de REEE tem vindo a aumentar nos últimos anos por todo o mundo criando desafios na gestão destes em todos os países. Segundo dados fornecidos pela United Nations University (UNU) estima-se que o volume de REEE cresça cerca de 5% de ano para ano como representado na tabela 2.1 em todos os continentes, sendo dos tipos de resíduos que mais rapidamente evolui em quantidade em toda a União Europeia. Mundialmente 123000000 kg de aparelhos elétricos e eletrónicos danificados, obsoletos ou simplesmente indesejados são descartados e formam diariamente o chamado *e-waste* (Baldé *et al.*, 2015).

**Tabela 2.1 – Quantidade de e-waste gerada a nível mundial por ano**

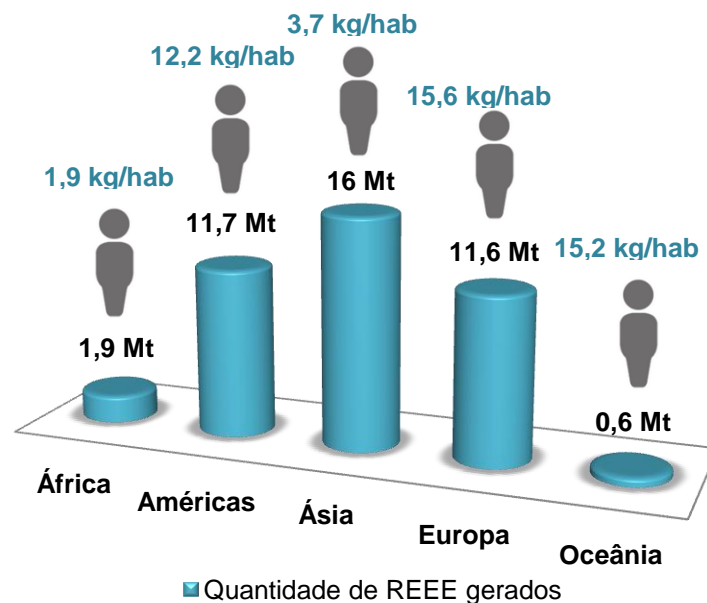
Adaptado de: Baldé *et al.* (2015)

Quantidade de e-waste gerada			
Ano	E-waste gerada (milhões de toneladas (Mt))	População (bilhões)	E-waste gerada (kg/habitante)
2010	33,8	6,8	5,0
2011	35,8	6,9	5,2
2012	37,8	6,9	5,4
2013	39,8	7,0	5,7
2014	41,8	7,1	5,9
2015	43,8	7,2	6,1
2016	45,7	7,3	6,3
2017	47,8	7,4	6,5
2018	49,8	7,4	6,7

Nota: Os dados a partir do ano de 2015 (inclusive) para a frente constituem previsões.

Em 2014 foram geradas 41,8 milhões de toneladas (Mt) de resíduos de EEE dos quais 1,0 Mt de lâmpadas, 3,0 Mt de equipamentos informáticos e de telecomunicações, 6,3 Mt de ecrãs e monitores, 7,0 Mt em equipamentos de refrigeração, 11,8 Mt de grandes eletrodomésticos e 12,8 Mt de pequenos eletrodomésticos. A UNU avança ainda com uma estimativa para 2018 de 49,8 Mt de REEE, um notável crescimento face aos valores apresentados em 2014 (Baldé et al, 2015).

A figura 2.2 ilustra as quantidades de REEE geradas por continente no ano de 2014, segundo a UNU.

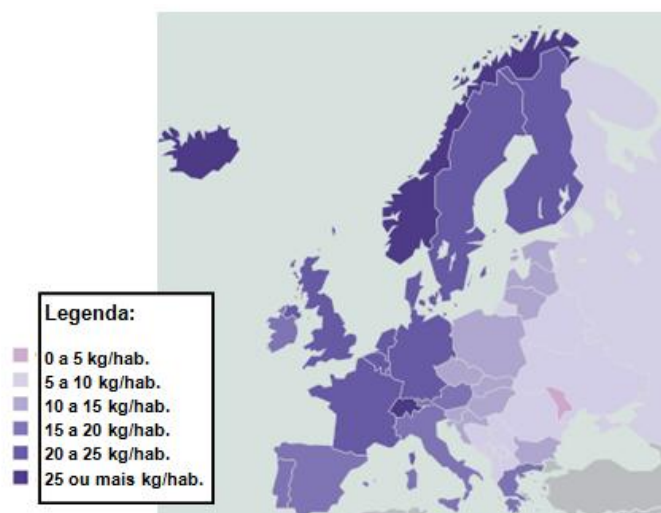


**Figura 2.2 – Quantidade de REEE mundialmente gerados**

É no continente Asiático que maiores quantidades de REEE são geradas, 16 milhões de toneladas só no ano de 2014. Porém, é na Europa que se verifica um maior peso por cidadão neste mesmo ano a rondar os 15,6 kg/habitante, tendo por isto quantidades de resíduos gerados bastante elevadas tendo em conta a população que possui, inferior a quase todos os continentes excetuando a Oceânia, fração do globo que apesar de possuir as quantidades de resíduos gerados mais baixo de 0,6 milhões de toneladas se denotam igualmente elevadíssimos valores nesta relação de peso por habitante (15,2 kg/habitante) (Baldé et al., 2015).

### 2.2.2. REEE em Portugal e na Europa

Em toda a Europa estima-se que a quantidade total gerada de resíduos de EEE durante 2014 seja de 11,6 milhões de toneladas. É na Alemanha que são geradas as maiores quantidades em milhões de toneladas de e-waste (1,8 Mt) seguindo-se o Reino Unido (1,5 Mt), a França (1,4 Mt) e a Rússia (1,2 Mt). Em quantidade por habitante estão em foco a Noruega que gera 28,3 kg/habitante de resíduos, a Suíça com valores a rondar os 26,3 kg/habitante e a Islândia com 26,0 kg/habitante durante 2014 (Baldé et al., 2015). As quantidades por habitante de resíduos gerados em toda a Europa encontram-se representadas no mapa da figura 2.4.



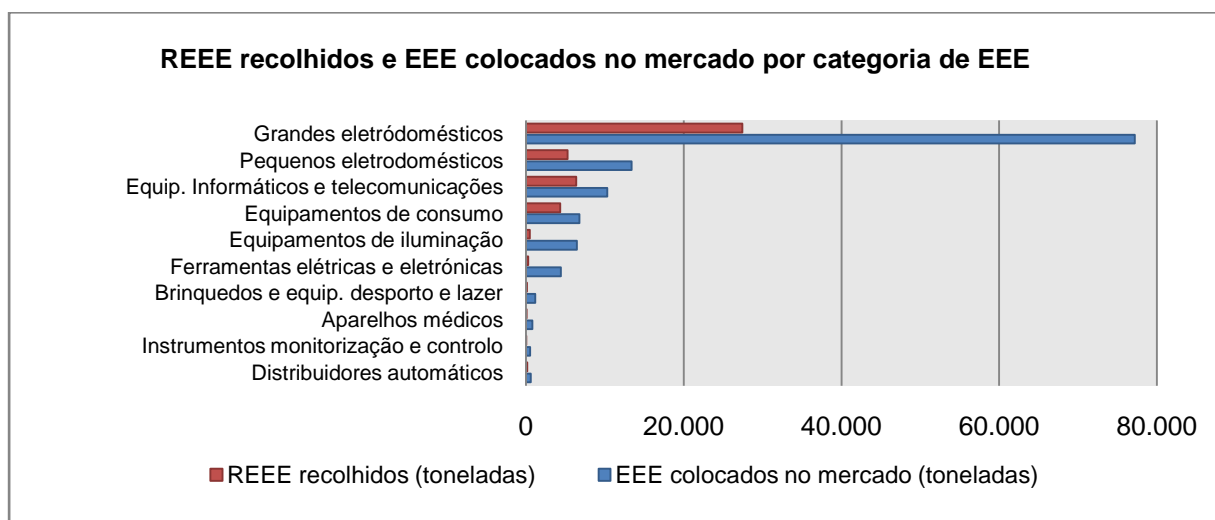
**Figura 2.3 – Quantidades por habitante de REEE geradas na Europa em 2014**

**Adaptado de: Baldé et al. (2015)**

Em 2012, na União Europeia dos 28 membros, foram colocadas 9185859 toneladas de equipamentos elétricos e eletrônicos no mercado, recolhidas 3561529 toneladas de resíduos e tratadas 2763007 toneladas no próprio estado membro que as produz, 210.600 tratadas noutro qualquer estado membro da UE e 72423 fora da União Europeia (EUROSTAT, 2015).

### **REEE em Portugal**

Em 2013, segundo dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), foram colocadas no mercado 121582 toneladas de EEE, 63% correspondentes a grandes eletrodomésticos (APA, 2015), primeira categoria de EEE definida no Anexo I do Decreto-Lei n.º 230/2004 (Decreto-Lei n.º 230/2004 de 10 de Dezembro, 2004). A figura 2.4 faz a representação dos REEE recolhidos em comparação com os EEE colocados no mercado por categoria de EEE em Portugal durante o ano 2013.

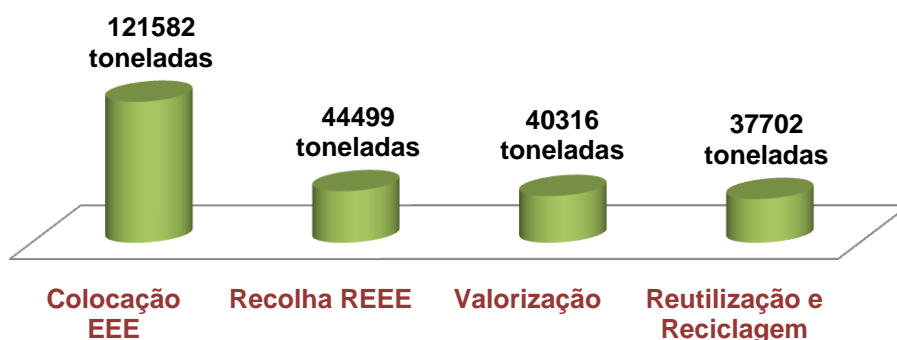


**Figura 2.4 – Colocação de EEE no mercado versus REEE recolhidos**

**Adaptado de: APA (2015)**

Todas as empresas que contribuem para a colocação de equipamentos elétricos e eletrónicos no mercado nacional, ficam obrigadas pelo Decreto-Lei 230/2004 a declarar a sua atividade anual à entidade de registo nacional de EEE, a ANREE (Decreto-Lei n.º 230/2004 de 10 de Dezembro, 2004). Detentora destas informações recolhidas anualmente e fornecidas pelas empresas nela registadas, a ANREE publica desde 2007 estudos de mercado que se consideram os mais próximos do valor real de mercado e que se pretende que o caracterizem.

A gestão de REEE em Portugal feita no ano 2013, segundo dados recolhidos pela APA (2015) encontra-se representada na figura 2.5. É possível verificar a quantidade de equipamentos elétricos e eletrónicos colocados no mercado assim como as toneladas recolhidas, valorizadas, reutilizadas e recicladas nesse mesmo ano.



**Figura 2.5 - Gestão de REEE em Portugal no ano de 2013**

**Adaptado de: APA (2015)**

Em 2013, atingiu-se uma taxa de valorização na ordem dos 91% e uma taxa de reutilização e reciclagem de 85% (APA, 2015).

A UNU estima que no ano de 2014 foram geradas 171000 toneladas de resíduos de EEE em Portugal, 16,2 kg por habitante (Baldé *et al.*, 2015). Segundo dados da Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (Amb3e) foram recolhidas no ano de 2014, 50255 toneladas de REEE em Portugal, mais 5756 toneladas que no ano anterior, e das quais 44375 (mais 11,54% que no ano anterior) seguiram para reciclagem (Amb3e, 2014).

A Amb3e que em 2013 contabilizou uma recolha total de 32092 toneladas, correspondentes a 3 kg/habitante (Amb3e, 2013), no ano de 2014 aumentou este valor para 35344 toneladas (Amb3e, 2014). A ERP (European Recycling Platform) Portugal procedeu à recolha e enviou para reciclagem 14.911 toneladas provenientes de particulares, 20% mais que o verificado em 2013 (ERP-Recycling, 2015).

### 2.3. Enquadramento legal

Os princípios para uma boa política de gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos encontram-se atualmente definidos e regulamentados a nível nacional pelo Decreto-Lei n.º 67/2014, de 7 de maio, transpondo a Diretiva 2012/19/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, reformulação da original Diretiva 2002/96/CE, de 27 de janeiro de 2003 com vista à aproximação das medidas nacionais dos Estados-Membros e as práticas atualmente aplicadas (Decreto-Lei n.º 67/2014 de 7 de maio, 2014).

O presente Decreto-Lei n.º 67/2014 vem então revogar o anterior Decreto-Lei n.º 230/2004, de 10 de dezembro, alterado pelos Decretos-Leis n.ºs 174/2005, de 25 de outubro, 178/2006, de 5 de setembro, 132/2010, de 17 de dezembro, 73/2011, de 17 de junho, e 79/2013, de 11 de junho (Decreto-Lei n.º 67/2014 de 7 de maio, 2014).

A transposição das diretivas europeias deve ter como fim, uma gestão de REEE de acordo com as normas jurídicas estabelecidas, uma gestão que embora incapaz de cessar por completo toda a geração destes resíduos, previna a sua produção, promova a sua valorização, através da sua reutilização, reciclagem e recuperação energética, reduzindo a quantidade de equipamentos elétricos e eletrónicos a eliminar, reduzindo a sua nocividade e salvaguardando desta forma os recursos naturais existentes com os consequentes benefícios e a nível económico, ambiental e de saúde humana (Decreto-Lei n.º 67/2014 de 7 de maio, 2014; Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho, 2012).

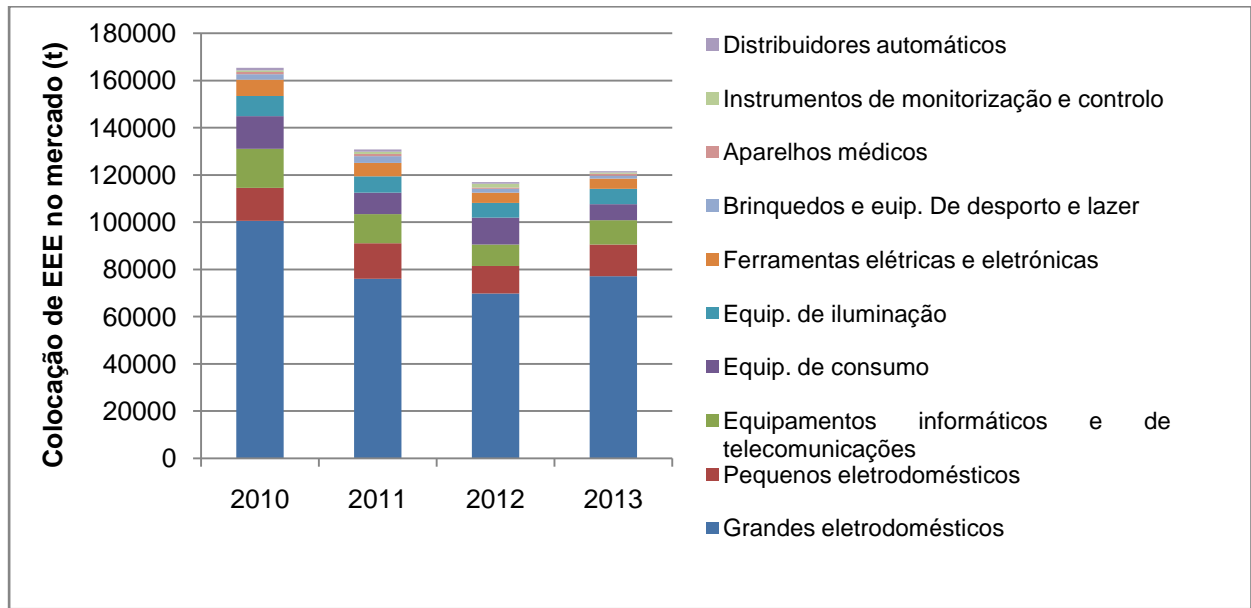
A nova diretiva europeia adotada em 2012 pressiona para metas muito mais ambiciosas, mas também mais justas, deixando de estar fixada uma taxa de recolha fixa de 4 kg/habitante para um valor variável em função do mercado. Desta forma, para atingir as novas metas estabelecidas, a partir de 2016, cada Estado Membro deve recolher 45% do peso médio dos equipamentos colocados no mercado nos últimos 3 anos. A partir de 2019 este valor passa para 65%, ou 85% dos resíduos de EEE gerados (Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho, 2012). As novas metas de recolha estabelecidas em diretiva dependendo do ano encontram-se representadas na tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Metas de recolha definidas pela diretiva europeia adotada em 2012**

<b>Anos</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
<b>Taxa de recolha</b>	Mínimo anual de 4 kg/habitante de REEE provenientes de particulares recolhidos durante os 3 anos anteriores				45% do peso médio dos EEE colocados no mercado nos três anos anteriores, provenientes de particulares e não particulares			85% de REEE gerados ou uma taxa de recolha de 65% do peso médio dos EEE colocados no mercado (média dos 3 anos anteriores) de REEE de proveniência particular e não particular	

Para atingir estas metas Portugal será obrigado a elevar a sua taxa de recolha num número que se considera elevado num curto espaço de tempo, avançando mesmo o diretor-geral da ANREE, Rui Cabral, com valores á volta dos 10 kg/habitante de recolha em 2018, para que Portugal consiga alcançar as metas juridicamente estabelecidas, tendo por isto de aumentar necessariamente capilaridade e diminuir fugas ao sistema de recolha atual (Cabral, 2013).

Em 2013 Portugal recolheu 4,2 kg/habitante de REEE provenientes de particulares, superando desta forma a meta de recolha de 4 kg/habitante (APA, 2015). A figura 2.6 faz a representação da quantidade de EEE colocados no mercado em Portugal por categoria de 2010 a 2013 (APA, 2015).



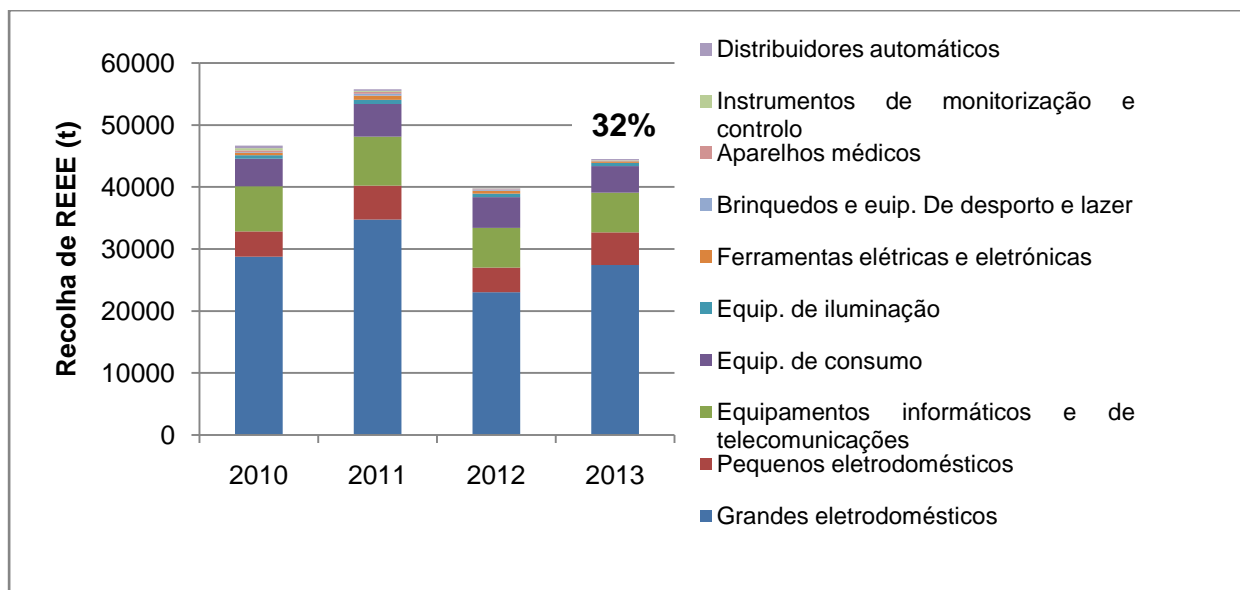
**Figura 2.6 – Toneladas de EEE, por categoria, colocadas no mercado em Portugal**

**Adaptado de: APA (2015)**

A categoria que mais se destaca em termos de toneladas colocadas no mercado em Portugal é a dos grandes eletrodomésticos. Analisando a figura 2.6 é igualmente conclusivo que desde 2010 que houve uma descida acentuada na quantidade de EEE colocados no mercado português.

A figura 2.7 faz a representação da quantidade de REEE recolhidos em Portugal de 2010 a 2013, por categoria de EEE, pretendendo fazer um balanço relativamente às toneladas de EEE colocadas no mercado durante este mesmo período e desta forma concluir se estamos em condições de atingir as novas metas estabelecidas a partir de 2016.

Como já enunciado na tabela 2.2 de acordo com a nova Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, a partir de 2016 a taxa de recolha mínima passa a ser de 45% calculada com base no peso total de REEE recolhidos num determinado ano no Estado Membro em causa, expressa em percentagem do peso médio dos EEE colocados em mercado nos três anos imediatamente anteriores ao ano em análise (Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho, 2012).



**Figura 2.7 – Toneladas de REEE recolhidos em Portugal (APA, 2015)**

Segundo resultados anuais fornecidos pela APA em 2013 ainda não estamos preparados para alcançar as novas metas estabelecidas a partir de 2016, pois, como representado na figura 2.7 atingimos apenas uma taxa de recolha a rondar os 32% (APA, 2015), aquém da que terá de ser futuramente apresentada.

## 2.4. Principais agentes envolvidos na gestão de REEE a nível nacional

Desde 2006 que o Ministro do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, e o Ministro da Economia e da Inovação, de acordo com o previsto no Decreto-Lei n.º 230/2004, de 10 de Dezembro licenciou a Amb3E, através do Despacho Conjunto n.º 354/2006, de 27 de Abril e a ERP Portugal, através do Despacho Conjunto n.º 353/2006, de 27 de Abril, como entidades gestoras de resíduos a nível nacional, passando estas a assumir responsabilidades inerentes ao cumprimento das medidas e ações instituídas pela legislação relativa á gestão do fluxo de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos em vigor (Diário da República n.º82/2006 Série II, 2006).

O registo obrigatório de produtores de EEE é responsabilidade da ANREE desde julho de 2005. Licenciada pela APA em 23 de março de 2006 tem o dever de assegurar, organizar e manter o registo de produtores de EEE, possibilitando o acompanhamento e fiscalização do total cumprimento das suas obrigações legislativamente afixadas (ANREE, 2015).

A figura 2.8 estabelece, segundo a ERP-Recycling o conjunto de missões que as entidades licenciadas a nível nacional têm a atingir (ERP-Recycling, 2015).



**Figura 2.8 – Missão contínua das entidades gestoras nacionais**

**Adaptado de: ERP-Recycling (2015)**

A Amb3E atualmente com mais de 1100 aderentes e 60 empresas associadas tem como missão a gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE) e de resíduos de pilhas e acumuladores portáteis e de resíduos de pilhas e acumuladores industriais incorporáveis em equipamentos elétricos e eletrónicos (Amb3e, 2015).

A ERP Portugal pertence à primeira plataforma Europeia de gestão de resíduos, a European Recycling Platform, fundada em 2002 em resposta à diretiva europeia sobre os REEE. Licenciada para exercer a sua atividade na administração de um sistema integrado de gestão de resíduos de EEE em Portugal opera a nível nacional desde Abril de 2006 (ERP-Recycling, 2015).

A ERP exerce em 32 países, conta com 2400 produtores a nível internacional e oferece serviços não só na gestão de REEE como também de Resíduos de Pilhas e Acumuladores (RP&A) e Resíduos de Embalagem (RE). Em Portugal, mais de 450 empresas se associarão ao Sistema Coletivo de Gestão de Resíduos (SCGR) da ERP, em ambos os fluxos geridos por esta (REEE e RP&A) (ERP-Recycling, 2015).

## CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MANUTENÇÃO

---

Neste capítulo será feita uma introdução a alguns conceitos considerados fundamentais para a criação de bases necessárias ao desenvolvimento de todo o trabalho.

### 3.1. Evolução da Manutenção

Desde 1940 que a evolução da manutenção pode ser descrita em três gerações.

A primeira geração assenta no período antes da Segunda Guerra Mundial. Uma indústria pouco mecanizada, onde a prevenção de falhas não era prioridade. As exigências produtivas não eram grandes pelo que a inoperatividade não era crítica, e manter uma manutenção baseada na reparação da avaria, ou seja, uma manutenção corretiva, era suficiente. A maioria dos equipamentos eram simples e projetados com precisão o que os tornava não só mais fiáveis como a sua reparação mais fácil, quem os projetava era também responsável pela sua fabricação e operação conhecendo como ninguém a máquina, a falha, o seu motivo, como repará-la e sobretudo as decisões preventivas a ter para esta não ficar inoperacional.

Até ao final dos anos quarenta, a manutenção cingia-se à reparação imediata de avarias e substituição de peças danificadas. Pinto (1999) considera que até ao final dos anos quarenta a Manutenção Industrial se encontrava num estado embrionário. Para o autor, com o surgimento das grandes linhas produtivas, notou-se o impacto significativo que as falhas e paragens das máquinas tinham nos custos do produto final, pelo que a Manutenção Industrial tinha de ser encarada de outra perspetiva.

O advento da revolução industrial em meados do século XIX revelou a necessidade de reparações regulares aos equipamentos surgindo novos desafios com a substituição do trabalho artesanal feito até então pela mecanização da produção. Era então necessária uma nova filosofia face às avarias, numa postura que se passava a querer proactiva. Foram introduzidas equipas especializadas durante a Primeira Guerra com o intuito de repararem os equipamentos no menor tempo possível, e de forma a cumprir novas metas de produção, mais significativas e exigentes (Filipe, 2006).

A expansão da aviação comercial durante os anos 40 foi também um fator impulsionador, que conduziu ao desenvolvimento de novas abordagens, obrigando à criação de novos métodos preventivos, visto que a resolução de problemas técnicos durante o voo se considera quase impossível de ser realizada (Farinha, 1997).

Durante a Segunda Guerra Mundial, a grande necessidade de mão-de-obra industrial e o aumento abrupto da necessidade de bens de consumo obrigou ao surgimento da manutenção preventiva, pois com a crescente dependência das máquinas surge a necessidade de evitar qualquer falha passando a manutenção a ter uma importância equivalente à da operação. O fato da mão-de-obra ser diminuta e a procura por bens crescer significativamente resultou num aumento da mecanização, e á entrada na segunda geração de evolução da manutenção (Moubray, 2000).

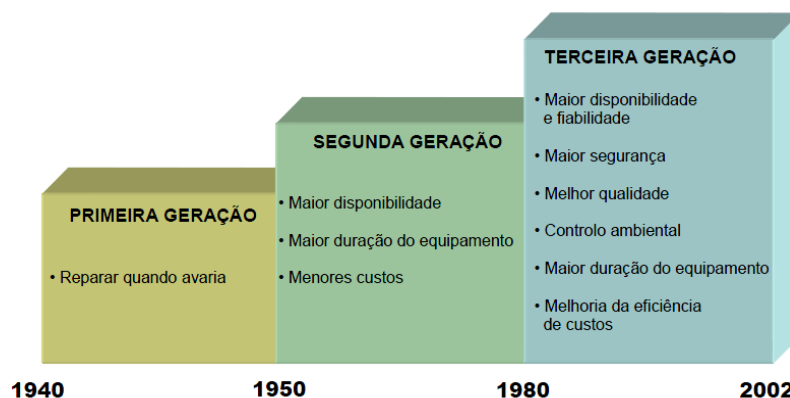
Surge então a preocupação não só pela correção das falhas numa atitude meramente reativa mas em evitar o seu aparecimento prevenindo anomalias.

A partir do fim da Segunda Guerra, começa a nascer então a engenharia de manutenção, focada na criação de modelos matemáticos e estatísticos de manutenção preventiva (Pinto, 1994). Este período é classificado por Pinto (1994) como a etapa 2, só não se evita a avaria como domina a preocupação pela máxima disponibilidade dos equipamentos.

Segundo Ebeling (1997), em 1960 surge uma manutenção centrada na fiabilidade, RCM (Reliability Centered Maintenance). Uma manutenção mais orientada para o controlo, em adivinhar a avaria, período que descreve a terceira etapa (Pinto,1994). Uma metodologia estruturada que emprega critérios de fiabilidade na determinação dos requisitos de manutenção de determinando sistema no seu contexto real. São identificadas as ações de manutenção a tomar tendo em conta as funções do equipamento e determinados os modos de falha associados a cada função e os seus efeitos (Ahuja & Khamba, 2008).

Estes critérios de previsão de falhas tornam-se exequíveis a partir do desenvolvimento de algumas áreas. O uso de computadores e processadores, aliada a novas técnicas de fabrico e um conhecimento mais amplo dos materiais, permitiu o acesso a sistemas de informações que permitiam prever a aproximação de falhas nos equipamentos.

A introdução à Microeletrónica foi também fulcral no auxílio à prevenção de falhas. Esta nova disciplina veio possibilitar o uso de aparelhos de medição de alta precisão capazes de monitorizar em tempo real o estado do equipamento, medindo os seus parâmetros de funcionamento, e a extrapolar o momento da sua falha, acrescentando valor ao conceito manutenção (Takahashi & Osada, 1990).



**Figura 3.1 – O crescimento das expectativas da manutenção**

**Adaptado de: (Quintas, 1998)**

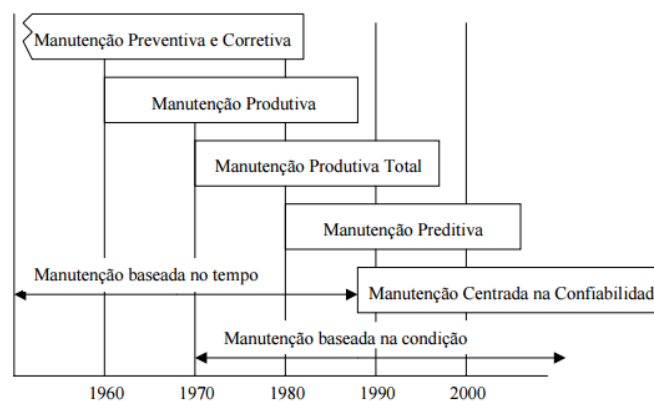
Apesar das notáveis vantagens da manutenção preventiva, existia ainda a clara necessidade de aumentar a sua eficiência global e rápida reação diminuindo a dependência desta do departamento de manutenção. Foi então que surgiu no Japão, no início dos anos 70, a metodologia TPM (*Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total) que faz uso não só da manutenção

preventiva como função isolada, mas aposta numa rotina criada para os operadores dos próprios equipamentos, na realização de certas atividades de manutenção (Takahashi & Osada, 1990).

A TPM promove a integração entre o homem, a máquina e a empresa, passando a manutenção a envolver a preocupação e ação de todos. Nos últimos anos da evolução da manutenção, esta passa a ser vista como uma estratégia por parte das empresas numa necessidade contínua e crescente pela qualidade dos seus produtos e serviços, primando também pela integridade ambiental (Zaions, 2003; Nakajima, 1993).

A terceira geração surge no âmbito dos efeitos da paralisação da produção serem cada vez mais críticos. Segundo Moubrey (2000) e Lafraia (2001), são vários os fatores que levaram à terceira geração: as novas expectativas relativamente à fiabilidade, à disponibilidade, à integridade ambiental, à segurança e o aumento dos custos totais da manutenção.

A figura 3.2 ilustra a evolução temporal das técnicas de manutenção nas indústrias (Lafraia, 2001).



**Figura 3.2 – Síntese da aplicação das metodologias de manutenção**

**Fonte: Lafraia (2001)**

### **3.2. Definição de Manutenção**

Definida pela norma NP EN 13306:2007, manutenção é a “ combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida” (NP EN 13306, 2007).

Entenda-se que o termo bem poderá assumir ao longo deste estudo a designação de sistema, subsistema, componente ou equipamento conforme a situação mencionada.

É desde já pertinente a definição de três conceitos básicos: o conceito de componente, o de equipamento e o do sistema.

Componente é um bem considerado não reparável, que após avaria passa a resíduo. Se for destinado a uma única utilização denomina-se por consumível. Constitui segundo Assis (2004), uma peça simples, mecânica ou elétrica/eletrônica impossível de ser desagregada. São exemplos de componentes, uma vela de ignição, um transistor.

Equipamento é considerado então como um conjunto de componentes que operam de forma a executar determinada função e por sistema, entenda-se como um conjunto mais complexo formado por equipamentos e componentes. O conceito de equipamento está frequentemente associado, embora nem sempre assim o seja, a sistemas reparáveis e o conceito de componente a itens não reparáveis (Didelet & Viegas, 2003).

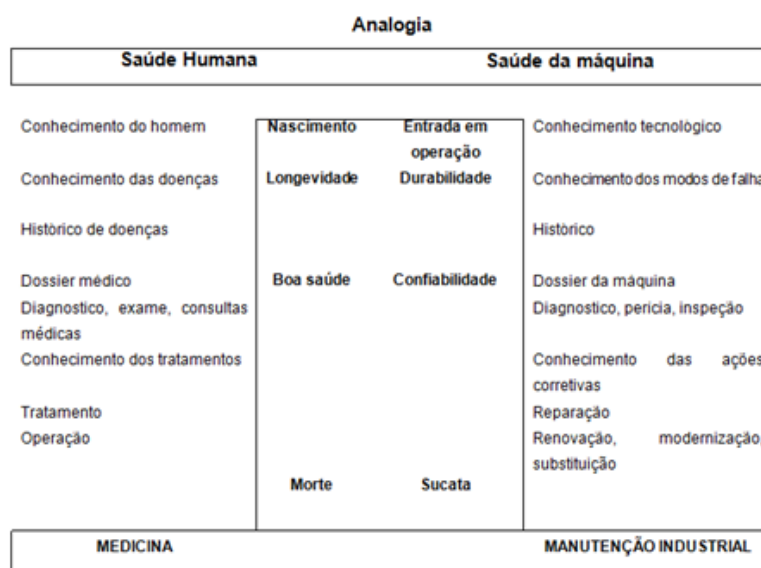
Voltando às definições de manutenção, são vários os autores que surgem na literatura com uma definição para a manutenção.

Para Monks (1987), a manutenção é uma atividade que permite manter os equipamentos ou outros bens em condições de alcançar metas organizacionais definidas. Portanto, uma atividade indispensável para alcançar objetivos organizacionais.

Segundo Cabral (1998), manutenção corresponde ao conjunto de ações que asseguram o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que estas sofrem intervenções no momento certo de forma a evitar avarias ou quebras no rendimento, e se tal acontecer, que sejam repostas nas melhores condições de operacionalidade, no menor tempo possível garantindo um custo total otimizado.

Sena & Didelet (2002), definem manutenção através da norma NFX60-010, como o leque de atividades que conservam ou repõem determinado estado ou nível de fiabilidade de um sistema, a pontos que este consiga cumprir em pleno as suas funções.

O termo “Medicina das Máquinas” surge com Monchy (1989) que introduziu esta nova abordagem estabelecendo uma comparação pertinente entre a vida Humana e a vida de uma Máquina (figura 3.3). A analogia de Monchy cria assim um paralelismo entre a saúde humana e a saúde das máquinas, e considera que tal como o Homem, a Máquina terá um período de vida distinguido por fases.



**Figura 3.3 – Comparação da saúde humana com a saúde das máquinas**

**Adaptado de: Monchy (1989)**

A vida do ser humano compreende-se entre o nascimento e a sua morte, a vida das máquinas é limitada pela sua entrada em serviço e o seu abate, ou fim de vida. Cada fase de vida desde a idade 0 á geriátrica terá a sua estratégia médica adequada, assim funciona com o objeto técnico.

Este mesmo autor define ainda a missão da manutenção como a gestão otimizada dos equipamentos das instalações de produção, alcançada com base em objetivos organizacionais definidos através do conhecimento de três fatores, o económico, o humano e o técnico (Monchy, 1989):

- **Fator económico** – menores custos de falhas e de produção e economia de energia;
- **Fator humano** – condições de trabalho, segurança e fatores ambientais;
- **Fator técnico** – disponibilidade e durabilidade dos equipamentos.

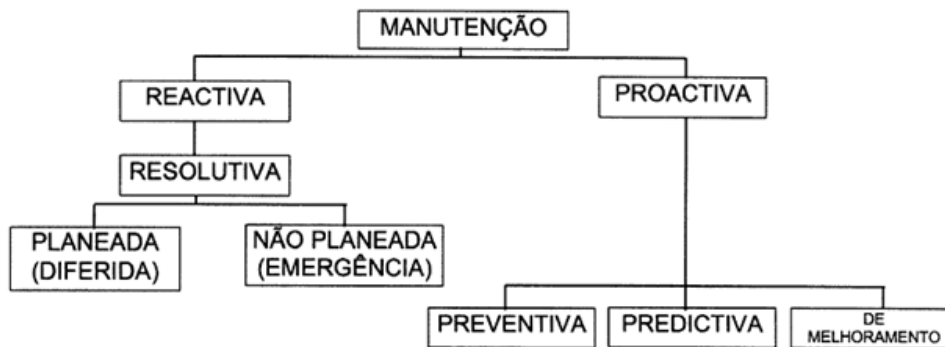
Entra assim em concordância com Farinha (1997) que define a manutenção como a combinação de ações de gestão, técnicas e económicas aplicadas aos equipamentos e que otimizam os seus ciclos de vida. Fazer manutenção passará por acionar um conjunto de operações, como lubrificação, reparação, melhoramentos, limpezas, capazes de manter ou repor os equipamentos num estado específico em que estes são aptos aos cumprimentos das suas funções, na melhor qualidade e segurança possível, a custos mínimos, a manutenção permite-nos desta forma (Farinha 1997):

- Reduzir Custos;
- Evitar Paragens que terão como consequência quebras na produção;
- Reduzir o número de avarias;
- Reduzir os tempos de intervenções, através de boas políticas de preparação de trabalho;
- Aumentar o tempo de vida dos equipamentos, preservando as suas capacidades o máximo de tempo possível;
- Melhorar a qualidade de produção;
- Aumentar a segurança de serviço.

### 3.3. Tipos de manutenção

A primeira forma de manutenção que se conhece na história consistia em atuar para efetuar uma reparação somente quando se dava a avaria e o equipamento falhava. Um tipo de manutenção denominada por resolutive, curativa ou corretiva, em que se reagia ao acontecimento depois da sua ocorrência e por isto uma manutenção do tipo reativa. A segunda forma de reação, denominada pró-ativa, acontecia antes da ocorrência da falha.

A atuação reativa está normalmente associada a ações não planeadas ao contrário da atuação do tipo pró-ativa que se associa a ações preventivas, normalmente planeadas. Esta é a visão mais elementar defendida por Pinto (1994), e este conceito de divisão em manutenção antes da falha e após a falha é referenciada por vários autores. Para este autor os tipos de manutenção dividem-se segundo o esquema apresentado na figura 3.4.

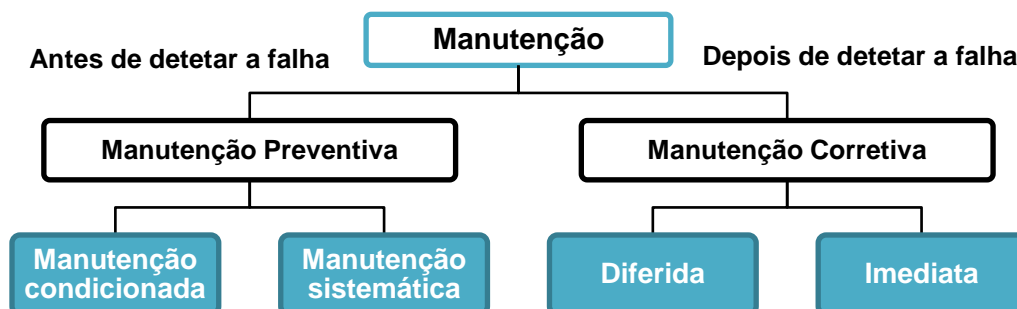


**Figura 3.4 – Diferentes formas de manutenção segundo Pinto**

**Adaptado de: Pinto (1994)**

Os tipos de manutenção citados em literatura indicam de que maneira a intervenção nos equipamentos deve ser efetuada. Ao longo desta é clara a falta de unanimidade relativamente à estrutura de divisão dos vários tipos de manutenção, apesar dos conceitos não divergirem.

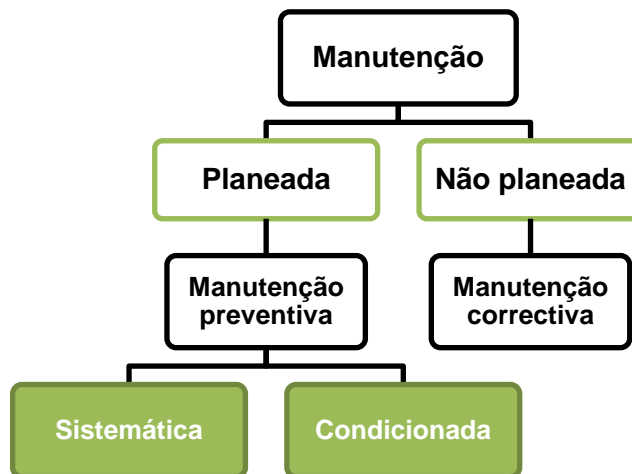
A norma NP EN 13306 2007 usa exatamente o conceito supra citado, definindo as duas primeiras formas de manutenção em antes de detetar a falha, a filosofia reativa mencionada por Pinto (1994) e a depois de detetar a falha, numa atitude pró-ativa. Os tipos de manutenção definidos pela norma NP EN 13306 2007 encontram-se esquematizados na figura 3.5.



**Figura 3.5 – Diferentes formas de manutenção segundo norma NP EN 13306 2007**

A manutenção efetuada antes da ocorrência da falha (preventiva) é subdividida em manutenção do tipo condicionada e sistemática. Já a manutenção que entra em ação após a falha ocorrer (corretiva) encontra-se subdividida em diferida e imediata.

Esta visão é partilhada por vários autores, sendo mais comumente designada a manutenção feita “antes de detetar a falha” como manutenção planeada e a efetuada “depois de detetar a falha” como manutenção não planeada (Didelet & Viegas, 2003). A figura 3.6 faz a representação das técnicas de manutenção mais destacadas e divulgadas, sendo a essas que será dado foco.



**Figura 3.6 – Diferentes formas de manutenção segundo Brito**

**Adaptado de: Brito (2003)**

Segundo Brito (2003), de um modo geral a manutenção de equipamentos ou bens pode ser esquematizada como se ilustra na figura 3.6. A manutenção divide-se em planeada e não planeada, a manutenção não planeada envolve ações de caráter corretivo enquanto a planeada envolve ações preventivas. A manutenção do tipo preventiva subdivide-se em sistemática e condicionada.

### **3.3.1. Manutenção corretiva**

A manutenção corretiva apresenta-se como a mais antiga e primária forma de manutenção, e permite ao equipamento operar continuamente até à ocorrência de uma anomalia e só então proceder à sua reparação, repondo com a maior brevidade possível as suas funções, como representado na figura 3.7 (Norma NP EN 13306, 2007).



**Figura 3.7 – Representação da manutenção do tipo corretiva**

**Fonte: Brito (2003)**

Por ser um tipo de manutenção que só atua quando já existe uma avaria, apresenta vários inconvenientes e impactos negativos na disponibilidade dos equipamentos, não permitindo o planeamento da imobilização das máquinas e prolongando os tempos de paragem (Pinto, 1994).

Segundo Ferreira (1998), é uma metodologia que comporta inúmeras consequências, pois não se consegue precisar o tempo de indisponibilidade a que vão ser sujeitos os equipamentos, pelos custos das reparações ou das peças de reserva, também estes incertos, e pela irregular carga de trabalho.

Para Zaions (2003), o recurso à manutenção corretiva acarreta outros aspetos negativos como o fato de a falha ocorrer inesperadamente e no momento mais inoportuno e poder constituir um perigo para outros componentes trazendo custos adicionais.

Dhillon (2002) acrescenta que a manutenção corretiva advém do fracasso na utilização de técnicas preventivas, que obrigam a ações urgentes nos equipamentos, pela ocorrência de uma falha inesperada. Deve por isso, ser uma técnica de manutenção reservada a equipamentos cuja indisponibilidade não traga efeitos demasiado nefastos para a produção e que suporte custos anuais aquando da reparação e de avarias imprevisíveis, aceitáveis (Dhillon, 2002; Brito, 2003).

A manutenção corretiva está presente na maioria das empresas, quer pela imprevisibilidade de algumas avarias acontecerem, sendo por isto difíceis de evitar, quer pela falta de implementação de boas práticas e metodologias de análise de históricos de falhas que não permitam tirar proveito de uma manutenção de carácter preventivo.

### **3.3.2. Manutenção preventiva**

Manutenção preventiva é a manutenção realizada em períodos pré-estabelecidos nos equipamentos e nas instalações, com vista à redução da probabilidade de avaria ou deterioração dos equipamentos e das suas condições de funcionamento (Norma NP EN 13306, 2007).

A manutenção preventiva deve tentar assegurar um fluxo contínuo de produção, que não seja interrompido por ações de manutenção fortuitas ou como resultado de uma má qualidade devido a um equipamento em mau estado de funcionamento, sendo uma aposta para a obtenção de elevados valores de disponibilidade.

Esta política de manutenção deve ser aplicada a elementos importantes para a empresa, cuja sua avaria resulte numa perda de produção ou de custos de paragem imprevisíveis, sendo por isto de extrema importância a aplicação de um sistema de manutenção que minimize ao máximo estas paragens de modo a obter níveis de produtividade elevados.

Considerando que as avarias nos equipamentos seguem um padrão estatístico, para a aplicação deste tipo de manutenção é fulcral o conhecimento da duração da sua vida média, e é de extrema importância o fator tempo para o planeamento de ações preventivas.

São definidas duas formas de manutenção preventiva:

- **Manutenção preventiva sistemática** - as substituições são planeadas, feitas num intervalo de tempo pré-estabelecido. A substituição dos componentes é independente do seu suposto bom estado de funcionamento (Cabral, 1998);
- **Manutenção preventiva condicional** – as substituições são decorrentes da análise do nível de degradação dos parâmetros de funcionamento do equipamento. Só agindo perante

valores considerados insatisfatórios. O equipamento é monitorizado de forma a encontrar sinais de eventuais falhas, é feito o controlo a vários parâmetros como a temperatura, vibrações e estado de degradação do óleo (Pinto, 1999).

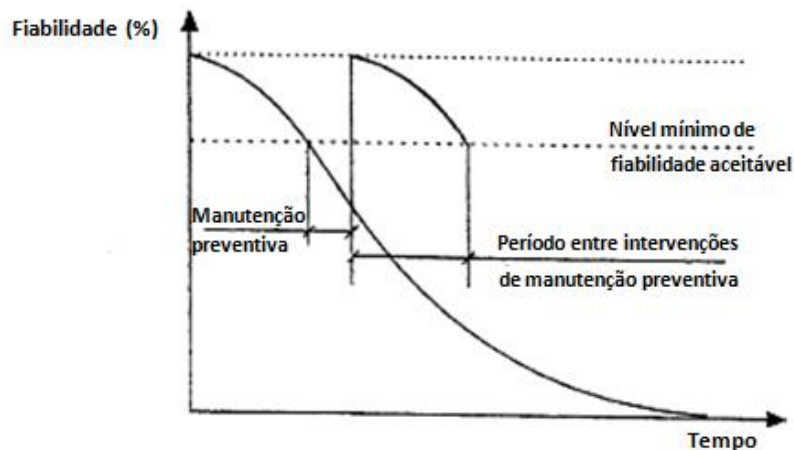
Ferreira (1998) resume os objetivos deste tipo de manutenção:

- Aumentar a fiabilidade dos equipamentos, reduzindo avarias e por isso custos associados a estas, aumentando a disponibilidade para a produção;
- Aumentar a duração de vida útil de um equipamento;
- Regular a carga de trabalho melhorando a delineação de trabalhos;
- Facilitar a gestão de *stocks* uma vez que se tornam mais previsíveis os consumos;
- Assegurar segurança nas intervenções, através da utilização de metodologias adequadas;
- Permitir a redução de avarias inesperadas, embora não as consiga cessar.

Para Zaions (2003), o objetivo final da manutenção preventiva resume-se à obtenção da utilização máxima do equipamento para executar as suas tarefas de produção, com a redução de tempo de máquina parada e custos de manutenção.

Este tipo de manutenção necessita de um trabalho ativo por parte dos responsáveis de manutenção pois é necessária a realização de diversas tarefas nos equipamentos estipulados para tal.

Como mostra a figura 3.8 as intervenções de manutenção preventiva devem garantir que o risco de falha se mantenha num valor pré-determinado, fixando-se um nível mínimo de fiabilidade aceitável. A intervenção preventiva ocorre então quando se atinge o valor pré-estabelecido de fiabilidade, e deve repô-la no seu valor inicial antes da avaria ocorrer (Brito, 2003; Pinto, 1999).



**Figura 3.8 – Fiabilidade de um sistema submetido a manutenção preventiva**

**Adaptado de: Pinto (1999)**

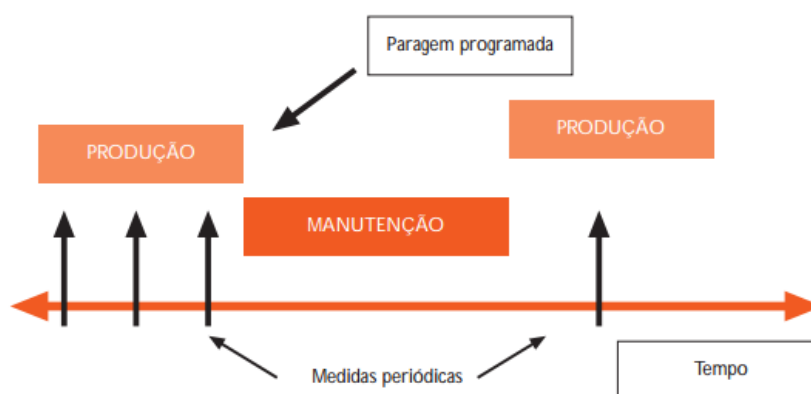
A adoção da política de manutenção preventiva introduz de facto qualidade no serviço de manutenção (Monchy, 1989).

## Manutenção preventiva sistemática

A norma NP EN 13306 2007 define manutenção preventiva sistemática como uma manutenção efetuada em períodos de tempos definidos ou de acordo com determinado número de unidades de utilização, como o número de peças produzidas ou horas de funcionamento (Norma NP EN 13306, 2007). São intervenções que se desencadeiam periodicamente, tendo por base o conhecimento da lei da degradação aplicável ao componente em análise e de um risco de falha que se assume que este irá ter (Didelet & Viegas, 2003).

São exemplos de tarefas em regime de manutenção preventiva sistemática as rotinas de lubrificação feitas em certos equipamentos, a regulação/afinação, a substituição ou a revisão geral, feitas de acordo com um plano ou programa pré-estabelecido, que melhor se adapte às necessidades da linha e da instalação e de forma a minimizar o risco de ocorrência de avarias graves.

Segundo Pinto (1999), as intervenções podem ser realizadas através de visitas ou inspeções sistemáticas aos equipamentos onde se procede a verificações periódicas a pontos do sistema considerados críticos e se intervém somente quando a inspeção considerar necessário, ou através de revisões gerais, onde são planeados trabalhos periódicos com paragem total do sistema. A figura 3.9 ilustra a forma de atuação da manutenção do tipo preventiva sistemática.



**Figura 3.9 – Representação da manutenção do tipo preventiva sistemática**

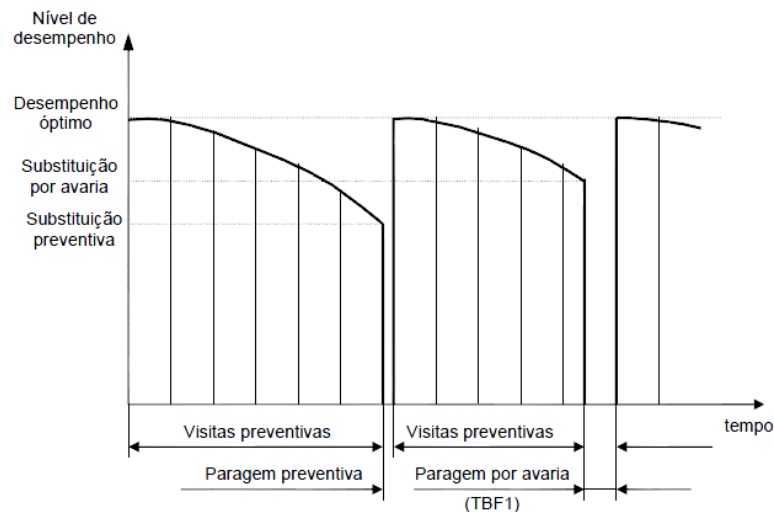
**Fonte: (Brito, 2003)**

Este tipo de manutenção é adequada a equipamentos ou sistemas que manifestem um comportamento de certa forma regular. De acordo com Ferreira (1998) a manutenção preventiva é aplicada nos seguintes casos:

- Em equipamentos com elevados custos de avaria;
- Equipamentos onde a ocorrência de uma avaria pode resultar numa paragem da instalação;
- Equipamentos onde a ocorrência de uma avaria pode pôr em risco a segurança das pessoas;
- Equipamentos onde a ocorrência de uma avaria pode implicar paragens longas.

A evolução da degradação de determinado componente sujeito a substituição preventiva, encontra-se demonstrada na figura 3.10. O padrão de degradação normalmente é conhecido. Após paragem para

substituição preventiva completa-se um ciclo e tem lugar um novo, até ser cessado para nova substituição se entretanto não ocorrer uma falha que leve a uma substituição por avaria, antes do tempo previsto de atuação (Monchy, 1996). Esta segunda paragem implica normalmente paragens mais longas. O recurso à manutenção preventiva sistemática não impede que as avarias fortuitas aconteçam mas aumenta o nível desempenho do componente, pela sua substituição.



**Figura 3.10 – Degradação de um componente sujeito a substituição preventiva**

**Adaptado de: Monchy (1996)**

São de notar alguns inconvenientes na utilização desta técnica (Brito, 2003; Ferreira, 1998):

- Pela redução do tempo de vida útil das peças uma vez que são substituídas antes de avariarem;
  - É impossível prever a ocorrência de certas falhas pontuais;
  - A exposição do equipamento durante uma intervenção pode aumentar o risco a novos danos, bem como a maior possibilidade de erro humano pela maior frequência de intervenções;
  - A grande dificuldade em tentar fazer coincidir os vários tempos entre falhas dos diversos componentes a substituir do sistema, numa tentativa de conseguir realizar todas as operações num único momento de forma de minimizar os efeitos de uma paragem;
  - E por fim as perdas de disponibilidade que advém de sucessivas e frequentes intervenções.
- A utilização deste modelo de manutenção consegue no entanto delinear ações de paragem em intervalos de tempo considerados ótimos para a manutenção, fundamentando-se no estudo da fiabilidade do sistema e seus componentes, e corretamente programada permite manter um nível alto de fiabilidade.

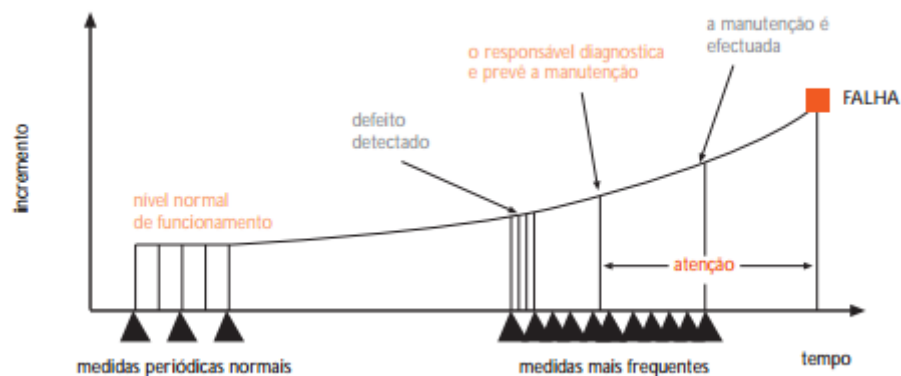
### **Manutenção preventiva condicionada**

Segundo a norma NP EN 13306 2007 manutenção preventiva condicionada é aquela que se baseia na vigilância do funcionamento de uma máquina e em parâmetros desse mesmo funcionamento (Norma NP EN 13306, 2007).

As intervenções condicionadas desenrolam-se no fim de vida útil dos componentes, momento que se considera ideal para prever a taxa de degradação deste até ao seu eventual colapso. Para tal faz-se um controlo sistemático da condição dos equipamentos através da medição de parâmetros que refletem a sua degradação. Se forem detetadas situações em que se ultrapassam valores de referência para os parâmetros definidos, pensa-se estar perante a iminência de uma avaria e é altura de agir. Na manutenção condicionada as atividades sistemáticas são as de controlo de condição, não as de manutenção como na manutenção sistemática, executando manutenção somente quando inevitável (Didelet & Viegas 2003).

Este tipo de manutenção é apropriado para equipamentos cuja avaria pode ser prevista através da degradação de características detetáveis por medição, observação ou análise.

Para Brito (2003), este tipo de manutenção é composta por três fases. Na fase 1 deteta-se o defeito pela medição de parâmetros como a pressão, temperatura, aceleração, intensidade de corrente e caudal. Numa segunda fase estabelece-se o diagnóstico localizando a origem do problema e fazendo uma previsão para a sua manutenção. Por último a análise da tendência (na figura 3.11 denominado por período de “atenção”), onde se prevê o tempo disponível que a manutenção tem para agir antes de ter lugar a avaria, um período de vigilância apertada (Brito, 2003). As fases supracitadas encontram-se ilustradas na figura 3.11.



**Figura 3.11 – Representação da manutenção do tipo preventiva condicionada**

**Fonte: Brito (2003)**

O fato de evitar sucessivas e excessivas substituições, possibilita alargar ao máximo o tempo de vida de cada componente, procedendo-se à sua substituição somente quando este dá sinais de não estar a funcionar corretamente. A utilização de peças de reserva (*stock*) também é reduzida.

Tem contudo algumas desvantagens associadas. Para Filipe (2006) a utilização desta política dificulta o planeamento das reparações e do controlo de *stock* de peças sobressalentes. Requer pessoal mais qualificado para o seu manuseamento e análise de resultados, qualificação que muitas vezes tem custos. Bases de tratamento de dados melhores, e por isso o recurso a tecnologia mais complexa e dispendiosa. Implica uma gestão individualizada do planeamento das intervenções e exige o controlo dos aparelhos de medição (Filipe, 2006).

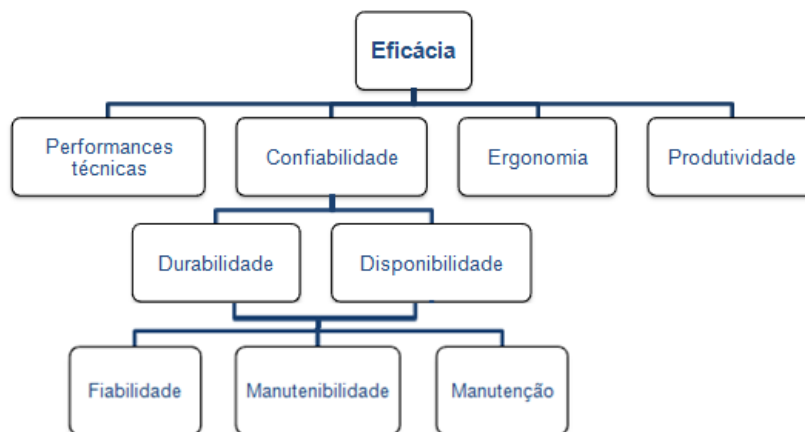
O mesmo autor cita ainda as formas de se proceder à leitura e recolha de dados fundamentais a esta metodologia (Filipe, 2006):

- Estrita ou de vigilância contínua, em que, como o nome indica, os equipamentos sofrem uma vigia e monitorização constantes;
- Larga ou de vigilância periódica, onde se faz a leitura dos parâmetros em intervalos de tempo pré-estabelecidos (normalmente coincidentes com as visitas preventivas);
- Integrada ou autovigilância executada pelo operador do próprio equipamento.

O êxito deste tipo de manutenção está na eficácia com que esta política de vigia ao estado do equipamento e garantia de que este se encontra dentro dos limites aceitáveis, é feita (Cabral, 2006).

### 3.4. Conceito de aptidão geral

Todos os sistemas, equipamentos ou componentes são fabricados com o intuito de cumprirem determinada função com a maior eficácia possível dentro das suas limitações. Esta eficácia, segundo Assis (2004), é caracterizada por quatro fatores principais: as performances técnicas ou aptidão para o desempenho de funções, a sua confiabilidade, ou confiança que este nos dá de que vai cumprir o seu serviço, permanecendo por isto operacional e disponível ao longo de um certo período da sua vida útil, o fator ergonómico caracterizado pela capacidade de utilização do sistema em condições seguras e de conforto e por último a produtividade, aptidão para o máximo valor e custo mínimo (figura 3.12) (Assis, 2004).



**Figura 3.12 – Conceito de aptidão geral**

**Adaptado de: Assis (2004)**

Na ocorrência de falhas e admitindo que não existem sistemas perfeitos, durante parte do seu período de vida útil, todos os sistemas se encontrarão em algum momento inoperacionais ou indisponíveis. E salientando que não existem sistemas perfeitos, qualquer sistema técnico tem um período de vida limitado, que pode ser maior ou menor dependendo de várias condições, definindo a sua durabilidade. Estes dois conceitos, a durabilidade e a disponibilidade, traduzem a confiabilidade (Assis, 2004).

E na base desta árvore de aptidão geral, encontramos por fim as características da qual dependem os conceitos acima mencionados: a fiabilidade, a manutibilidade e a manutenção, características mensuráveis que definem a longevidade e o comportamento em de um sistema em período de vida (Assis, 2004).

### 3.5. Gestão da manutenção

Define-se por gestão da manutenção o conjunto das atividades de gestão que estabelecem os objetivos, a estratégia e as responsabilidades da manutenção, e que procedem à sua implementação através do planeamento, controlo e supervisão desta e da melhoria contínua dos métodos da organização incluindo os fatores económicos (Norma NP EN 13306, 2007).

A grande competitividade existente nos dias de hoje entre as empresas exige que estas estejam bem preparadas, que eliminem desperdícios e que acrescentem valor aos seus produtos, mantendo um certo nível de competitividade de forma a conseguir assegurar o seu futuro (Ahuja & Khamba, 2008).

É clara a interdisciplinaridade necessária para o desempenho da gestão da manutenção. Esta interdisciplinaridade envolve duas vertentes: a vertente *Hard* e a vertente *Soft*. A vertente *Hard* diz respeito à execução técnica associada à reparação dos sistemas avariados enquanto a vertente *Soft* diz respeito às técnicas estatísticas a utilizar na gestão da manutenção e que permitem avaliar de forma objetiva a fiabilidade dos sistemas reparáveis (Assis, 2013).

Segundo Dias *et al.* (2007) a manutenção industrial deve direcionar as suas áreas de intervenção na avaliação do valor e da profundidade das atividades a desenvolver, de forma a não se focar apenas nas áreas específicas de reparação (componente *Hard* da manutenção) mas acima de tudo deve agarrar-se à gestão da manutenção (componente *Soft*) de forma a que as ações de manutenção desempenhadas se baseiem em modelos de fiabilidade associados aos respetivos custos.

Wireman (2005) reúne um conjunto de objetivos que devem ser cumpridos pela gestão da manutenção:

- Deve certificar que a produção se cumpre com o menor custo possível, com a qualidade desejável e dentro dos padrões de segurança exigidos;
- Identificar custos nos processos de manutenção e sempre que possível reduzi-los;
- Elaborar registos das ações de manutenção aplicadas;
- Otimizar os recursos disponíveis para a manutenção, tanto humanos como materiais;
- Minimizar o consumo de energia;
- Minimizar o *stock* de consumíveis.

Desta forma os objetivos e estratégias da gestão da manutenção vão de encontro aos objetivos da organização, e desta forma devem funcionar em conjunto para obtenção dos melhores resultados.

### 3.6. Modelos de gestão da manutenção

#### 3.6.1. Manutenção Centrada na Fiabilidade (*Reliability Centered Maintenance – RCM*)

O *Reliability Centered Maintenance* (RCM) é a filosofia da manutenção usada para determinar quais os procedimentos a desenvolver no sentido de garantir que qualquer ativo físico continue a cumprir as suas funções no contexto operacional em que se encontra inserido, diagnosticando os vários fatores que contribuem para a não fiabilidade deste assim como as medidas a tomar para implementá-la (Moubray, 2000; Didelet & Viegas, 2003).

Para Cabral (2006) a RCM destina-se fundamentalmente à eleição para cada equipamento, em função do seu grau de criticidade, da combinação ideal dos tipos de manutenção a utilizar de forma a atingir objetivos técnico-económicos definidos pela gestão. Promovendo a aplicação de políticas de manutenção, que tenham em conta as funções do equipamento no contexto em que opera, os seus tipos de avarias, assim como os seus efeitos e consequências não apenas numa ótima produtiva mas focada na segurança do pessoal, bens e meio ambiente.

Segundo a norma SAE JA1012, a utilização da estratégia RCM deve procurar responder a um conjunto de 7 questões chave sobre o equipamento ou sistema sujeito a avaliação (Norma SAE JA1012, 2002):

- **Funções:** Quais as funções e os níveis de desempenho que se esperam do componente no seu contexto operacional atual?
- **Falhas funcionais:** De que formas podem os componentes deixar de cumprir as suas funções?
- **Modos de falha:** O que provoca cada uma das falhas funcionais identificadas?
- **Efeitos das falhas:** O que acontece após o surgimento da falha?
- **Consequências das falhas:** Qual a importância das falhas?
- **Tarefas pró-ativas e frequência de ocorrência:** O que deve ser feito para prevenir ou prevenir cada falha?
- **Ações padrão:** Que medidas podem ser tomadas se for impossível implementar uma metodologia pró-ativa adequada?

Para Moubray (1997), a implementação da metodologia de manutenção centrada na fiabilidade tem como principal objetivo a otimização da relação custo/eficácia da manutenção, permitindo atingir quando bem implementado, o seguinte conjunto de resultados:

- Maior segurança humana e proteção ambiental;
- Melhoria do desempenho operacional em qualidade, quantidade e serviço ao cliente;
- Maior efetividade do custo de manutenção;
- Aumento do tempo de vida útil dos ativos físicos mais dispendiosos;
- Criação de um banco completo de dados de manutenção;

- Maior motivação do pessoal envolvido na manutenção;
- Melhoria do trabalho em equipa.

Estabelecem-se assim programas de manutenção especificamente preventiva mais eficientes tendo em conta os defeitos e possibilidades de avaria que podem ter lugar durante a produção, armazenagem, operação e manutenção dos equipamentos. Esta técnica permite ainda a normalização dos defeitos potencialmente detetáveis e à construção de árvores de falhas (Didelet & Viegas, 2003).

A implementação do RCM é feita com base em critérios de fiabilidade, através da aplicação de métodos específicos como o *Failure Mode Effects and Analysis* (FMEA) (Moubray, 1997).

A análise FMEA é uma das mais utilizadas em engenharia de fiabilidade por ser extremamente prática e de aplicação quantitativa. Foi empregada pela Volkswagen na década de 50 e em 1963 desenvolvida pela NASA. Em 1977, a Ford Motor Company passa a usar a FMEA para apoiar a fabricação de automóveis (Fernandes & Rebelato, 2006).

A análise de FMEA sofreu posteriormente a inclusão do critério criticidade passando a ser descrita por *Failure Mode Effects and Criticality Analysis* (FMECA). Esta criticidade pode ser calculada por vários métodos sendo os mais comuns o método do Número de Prioridade de Risco ou *Risk Priority Number* (RPN) e o método descrito pela norma padrão para análise de criticidade, a MIL-STD-1629<sup>a</sup>.

Para aplicar e desenvolver as técnicas utilizadas na RCM é fundamental compreender três conceitos base, a fiabilidade, a manutibilidade e a disponibilidade e os indicadores relacionados a cada conceito (Didelet & Viegas, 2003).

### **3.6.2. Manutenção produtiva total (*Total Productive Maintenance* – TPM)**

É no início dos anos 70, que surge no Japão pelo grupo TOYOTA, a manutenção produtiva total ou TPM como uma nova filosofia de gestão da manutenção. Esta filosofia, que teve grande expansão a partir dos anos 80, destaca-se pela inclusão das pessoas da produção na manutenção de forma ativa, admitindo que são estas que melhor conhecem as máquinas (Didelet & Viegas, 2003; Cabral, 1998).

A manutenção produtiva total conta então com a participação de todos os elementos da cadeia operativa, desde o operador da máquina, passando pelo pessoal da manutenção, chefias intermédias e níveis superiores de gestão. Para uma boa aplicação desta metodologia, o pessoal da produção deve estar apto a efetuar algumas atividades de manutenção de forma espontânea assim como outras atividades adquiridas por formação adicional que lhes deve ser fornecida. Os elementos da manutenção deverão ter formação superior nas áreas de mecânica e eletrónica e os engenheiros de processo capacidade para desenvolver e projetar equipamentos que exijam o menor número de intervenções de manutenção possível (Brito, 2003).

A ISO 9000 (conjunto de normas técnicas que estabelecem políticas de implementação de sistemas de gestão da qualidade para organizações em geral) foi introduzida em várias empresas tanto

européias como nacionais que avançaram posteriormente na adoção da TPM. A filosofia TPM recorre a vários indicadores de forma a calcular o desempenho de uma organização. Um dos indicadores mais utilizados é o indicador de Eficiência Global ou *Overall Equipment Efficiency* (OEE) (Didelet & Viegas, 2003). A filosofia TPM recorre a vários indicadores de forma a calcular o desempenho de uma organização. Um dos indicadores mais utilizados é o indicador de Eficiência Global ou *Overall Equipment Efficiency* (OEE). A eficiência interna de uma organização é caracterizada pela correta execução das suas atividades. O indicador OEE relaciona e associa a disponibilidade, a produtividade e a qualidade (Didelet & Viegas, 2003).

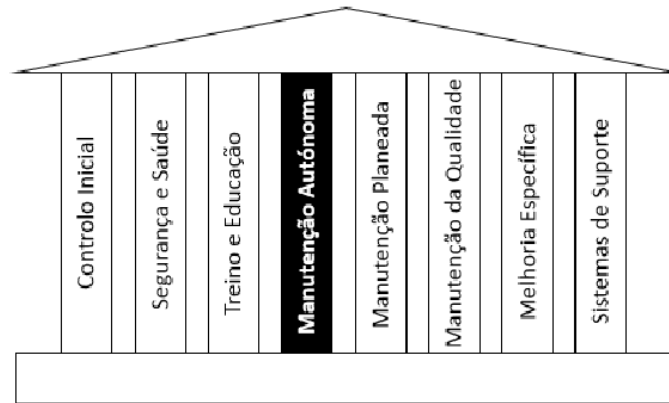
A TPM rege-se por uma procura constante de eficiência e rentabilidade dos equipamentos, com o objetivo de atingir as zero falhas através da aplicação da manutenção preventiva, da melhoria dos equipamentos e a participação integrada de todos os elementos da cadeia operativa no processo (Ahuja & Khamba, 2008). A prática deste princípio dos zero defeitos pretende eliminar as falhas, defeitos, desperdícios e obstáculos à produção, maximizando a eficiência global dos equipamentos e logo que aplicada existem melhorias na produtividade tanto das instalações como do pessoal, combate ao desperdício, redução dos custos de fabrico e combate ao excesso de *stocks* (Brito, 2003; Didelet & Viegas, 2003).

Segundo Cabral (1998) através da TPM, são esperados resultados que se podem dividir em tangíveis e intangíveis. Dos tangíveis listam-se:

- Aproximação a zero falhas;
- Fiabilidade das máquinas;
- Diminuição dos tempos de paragem dos equipamentos;
- Aumento da produtividade, tanto das instalações como do pessoal;
- Diminuição dos acidentes de trabalho;
- Diminuição de recursos necessários à produção, como a energia;

Os resultados intangíveis caracterizam-se pelo aumento da motivação dos trabalhadores, a criação de um melhor ambiente de trabalho assim como a melhoria da imagem da empresa (Cabral, 1998).

A implementação da TPM baseia-se em oito princípios caracterizadores denominados por pilares (Boris, 2006). Os oito pilares da TPM encontram-se esquematizados na figura 3.13.



**Figura 3.13 – Os oito pilares da TPM**

**Adaptado de: Boris (2006)**

Cada pilar representa respetivamente (Boris, 2006; Didelet & Viegas, 2003):

- Controlo inicial do equipamento e produtos – reduz o desperdício que ocorre durante a implementação de um novo equipamento ou produção de um novo produto;
- Higiene, segurança e controlo ambiental – pretende-se evitar acidentes de trabalho e proteger o meio ambiente;
- Formação – com vista à melhoria das capacidades do operador e do responsável da manutenção aumentando a produtividade;
- Estruturação da manutenção autónoma – operador tem uma extrema importância uma vez que a manutenção diária é realizada pelo próprio prevenindo a degradação dos equipamentos;
- Estruturação da manutenção planeada – com vista às zero falhas;
- Manutenção da qualidade – prevenir perdas;
- Melhorias nas máquinas;
- Extensão da TPM aos serviços administrativos.

### **Indicadores de desempenho da TPM:**

Existem seis perdas produtivas apontadas pela TPM que devem ser eliminadas para obtenção de um rendimento global de um equipamento, são elas (Brito, 2003):

- Perdas por avarias nos equipamentos;
- Perdas por mudança de linha ou ajustes;
- Perdas pela operação em vazio ou interrupções momentâneas;
- Perdas por redução da velocidade nominal de produção;
- Perdas por defeitos gerados no processo;
- Perdas por não atingir o regime normal de produção.

O rendimento operacional é um indicador que surgiu para administrar as seis perdas produtivas apontadas pela TPM, e é obtido pela multiplicação de três importantes fatores, a disponibilidade o desempenho e a qualidade (Brito, 2003).

Antes de enunciar as equações dos diferentes indicadores de desempenho é importante definir os diferentes tempos envolvidos durante a produção. A norma Renault E41.50.505.R descreve os principais tempos de estado de uma instalação, ou seja, os tempos durante os quais a instalação se encontra em determinado estado (funcionamento, parada...).

Os diferentes tempos de estado de uma instalação são caracterizados por (norma Renault E41.50.505.R, 2001):

**Tempo total (TT)** – define-se como um tempo de referência que se escolhe para análise, inclui todos os estados da instalação, normalmente é o horário de produção da fábrica;

**Tempo não requerido (TNR)** – é o período dentro do tempo total durante o qual não se prevê produção por motivos vários como pausas para almoço ou manutenções programadas;

**Tempo potencial disponível (Td)** – é o período do tempo não requerido durante o qual o operador poderia produzir;

**Tempo de indisponível (Ti)** – complemento do tempo potencial disponível (Td), correspondente ao tempo realmente não disponível para produção;

**Tempo requerido (TR)** – é o período dentro do tempo total em que a instalação se encontra requisitada para a produção, em que existe disponibilização das máquinas, produtos e meios humanos para tal;

**Tempo de funcionamento (TF)** – tempo durante a qual se produzem peças boas ou más. Inclui os tempos de bom funcionamento (TBF) durante o qual se produzem peças de boa qualidade e o tempo de funcionamento degradado (TFD) durante o qual se produzem más peças, se funciona com um tempo de ciclo superior ao de referência ou se está perante um tempo de funcionamento degradado por determinada função estar fora de serviço;

**Tempo de paragens próprias (TPP)** – é o período de paragem cuja causa pertence ao meio de fabricação. Inclui os tempos de paragem por avaria (TPA), quer sejam na máquina, nas ferramentas ou produtos, os tempos de paragem de exploração (Tae) provocados pela impossibilidade do operador levar a cabo a sua função e os tempos de paragem funcional (TAF), causados por causas funcionais como mudança/regulação de ferramentas, mudança de produto, controlo de qualidade, ao produto fabricado ou a indicadores como a pressão e a temperatura;

**Tempo de paragens induzidas (TPI)** – tempo de paragens não programadas originadas por causas ligadas a fatores externos. Inclui os tempos de paragem induzidos por saturação, os tempos de paragem induzidos por falta de peças (falta de alimentação), entre outros, como falta de energia ou fluidos.

A representação dos diferentes tempos envolvidos durante a produção é apresentada na figura 3.14.

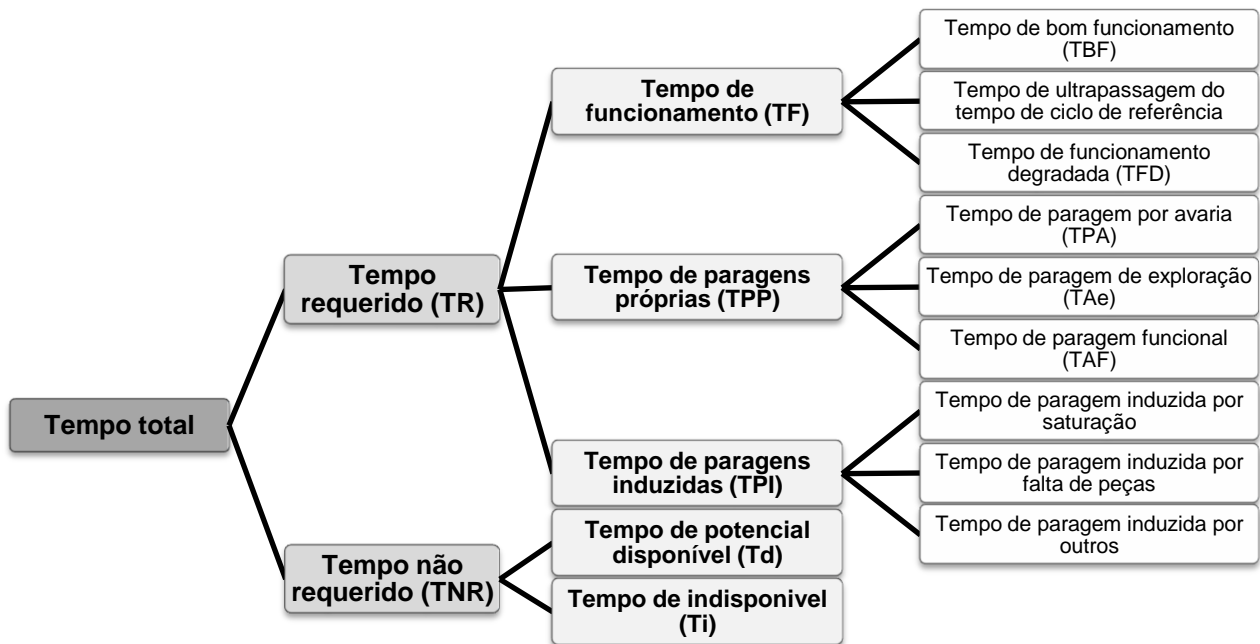


Figura 3.14 – Decomposição dos tempos de estado de um equipamento

Adaptado de: Norma Renault E41.50.505.R (2001)

São vários os indicadores de desempenho da TPM, indicados na norma Renault E41.50.505.R (Renault E41.50.505.R, 2001):

· **Disponibilidade:**

$$D_o = \frac{TF}{TR} = \frac{TR - (TPP + TPI)}{TR} \quad (3.1)$$

Onde:

$D_o$  – Disponibilidade Operacional

$TF$  – Tempo de funcionamento

$TR$  – Tempo requerido

$TPP$  – Tempo de paragens próprias

$TPI$  – Tempo de paragens induzidas

$$D_p = \frac{TF}{TF + TPP} \quad (3.2)$$

Onde:

$D_p$  – Disponibilidade própria

$$D_i = \frac{TR - TPI}{TR} \quad (3.3)$$

Onde:

$D_i$  – Disponibilidade induzida

A disponibilidade operacional também pode ser representada pela expressão 3.4, que associa a disponibilidade própria e a disponibilidade induzida:

$$Do = Dp \times Di \quad (3.4)$$

· **Produtividade:**

O indicador produtividade exprime o comportamento produtivo do equipamento (Didelet & Viegas, 2003). As várias produtividades (operacional e própria) podem ser expressas através das expressões 3.5 e 3.6 respetivamente:

$$Po = \frac{NPR}{TR} \quad (3.5)$$

Onde:

$Po$  – Produtividade Operacional

$NPR$  – Número de peças realizadas

$$Pp = \frac{NPR}{TF + TPP} \quad (3.6)$$

Onde:

$Pp$  – Produtividade própria

· **Rendimento Velocidade:**

$$Rv = \frac{Tcth}{Tcm} \quad (3.7)$$

Onde:

$Rv$  - Rendimento velocidade

$Tcth$  - Tempo de ciclo teórico

$Tcm$  - Tempo de ciclo real médio

O tempo de ciclo teórico representa o tempo que é necessário para produzir uma peça à velocidade nominal e o tempo de ciclo real, o tempo que de fato é necessário para produzi-la (Didelet & Viegas, 2003). O tempo de ciclo real médio pode ser determinado através da expressão 3.8:

$$Tcm = \frac{TF}{NPR} \quad (3.8)$$

· **Nível de qualidade:**

A taxa de qualidade define-se pela relação entre o número de peças boas fabricadas e o número de peças realizadas e exprime-se pela expressão:

$$Tq = \frac{NPB}{NPR} \quad (3.9)$$

Onde:

$Tq$  - Taxa de qualidade

*NPB* - Número de peças boas fabricadas

**Rendimento Operacional:**

$$R_o = \frac{NPB}{NPTR} \quad (3.10)$$

Onde:

*R<sub>o</sub>* - Rendimento Operacional

*NPTR* - Número de peças teoricamente realizáveis no tempo requerido

$$NPTR = \frac{TR}{T_{cth}} \quad (3.11)$$

O rendimento operacional pode ser obtido através da multiplicação dos fatores disponibilidade, rendimento velocidade e taxa de qualidade como representado na expressão 3.12:

$$R_o = D_o \times R_v \times T_q \quad (3.12)$$

### 3.7. Indicadores de desempenho da manutenção:

#### 3.7.1. Fiabilidade

Define-se fiabilidade como a aptidão que um bem tem em cumprir uma função solicitada em determinadas condições durante um certo intervalo de tempo. O termo fiabilidade também é utilizado como medida de desempenho podendo assim ser também definido como uma probabilidade (Norma NP EN 13306, 2007).

São de considerar dois conceitos chave, o TBF (*Time Between Failures*) ou Tempo de Bom Funcionamento, que constitui o tempo entre duas avarias consecutivas num determinado equipamento, e o MTBF (*Mean Time Between Failures*) correspondente ao valor médio dos TBF para o equipamento em análise. O inverso do MTBF representa outro conceito importante, a taxa de avarias ( $\lambda$ ) quando esta é constante.

O MTBF representa a “esperança matemática” das avarias, ou seja o tempo espectável ao fim do qual um equipamento, quando usado em condições ditas normais, avaria (Didelet & Viegas, 2003):

$$MTBF = \theta = \frac{\sum TBF}{N} \quad (3.13)$$

Onde:

*N* - Número de avarias verificadas no período de tempo considerado

O tempo entre avarias pode ser substituído por outra unidade de contagem, como por exemplo quilómetros, ciclos, horas (Didelet & Viegas, 2003).

O tempo médio mínimo entre falhas ou MTBF mínimo ( $\theta_i$ ), e por isso, correspondente à taxa de falhas máxima, pode ser determinado a partir da expressão 3.14:

$$\theta_i = \frac{2 \times T}{\chi_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}^2} \quad (3.14)$$

Onde:

$T$  – Tempo total de funcionamento

$n_f$  - Número de falhas

Para equipamentos não reparáveis, que apresentam uma única falha no seu ciclo de vida útil, utiliza-se o indicador MTTF (*Mean Time To Failure*) ou Tempo Médio até à Falha.

### Taxa de falhas

Considera-se falha ou avaria a cessação ou interrupção da capacidade de um bem para realizar a função específica para a qual foi concebido (Pinto, 2004).

As falhas podem ser classificadas tendo em conta vários aspetos, como a sua origem, velocidade, criticidade ou a idade desta.

A taxa de falhas ( $\lambda$ ) representa o número de falhas por unidade de tempo, ou de utilização mais concretamente, uma vez que esta unidade de tempo pode ser por exemplo de avarias/hora no caso de se considerar o funcionamento de uma máquina ou falhas/km no caso de se tratar de um veículo.

$$\lambda = \frac{N}{T} \quad (3.15)$$

Como já anteriormente referido, o MTBF corresponde ao inverso da taxa de falhas  $\lambda$ :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.16)$$

A taxa de variação do número esperado de falhas ( $dE[N(t)]$ ) em relação ao tempo  $dt$ , é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{dE[N(t)]}{dt} \quad (3.17)$$

Onde:

$N(t)$  - Número de falhas que ocorrem durante o intervalo  $[0, t]$

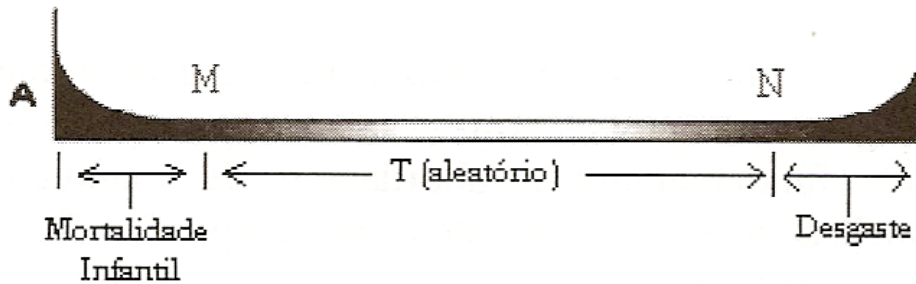
Esta função denominada intensidade, pode também ser referida como taxa de renovação, intensidade de falha, taxa de degradação ou taxa de ocorrência de falhas (ROCOF – *Rate Of Occurrence Of Failures*) (Assis, 2013).

Pode estimar-se o valor de  $\lambda(t)$  através da aproximação representada pela expressão 3.18:

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} \quad (3.18)$$

A ocorrência de falhas nos equipamentos segue a esquematização apresentada na figura 3.15 pela curva do tempo médio de falhas ou “curva da banheira”. Este é o padrão de falhas generalista e representa o modo de degradação dos equipamentos ao longo da sua vida útil.

Esta degradação influencia diretamente a taxa de avarias ( $\lambda$ ) ao longo do tempo.



**Figura 3.15 – Padrão de falhas ou “curva da banheira”**

**Adaptado de: Cabral (1998)**

Segundo a curva apresentada, um equipamento recente tem uma maior probabilidade de vir a sofrer uma falha que o impeça de cumprir as suas funções nas primeiras semanas de funcionamento devido a possíveis problemas de instalação, de fabrico, de transporte ou simplesmente inexperiência do operador. Após este período denominado por “mortalidade infantil” o equipamento entra no seu tempo de “vida útil” onde se considera que a probabilidade de falha é relativamente baixa e permanecendo assim durante um certo intervalo de tempo, até aumentar progressivamente com o desgaste do equipamento, e entrar na fase de “envelhecimento” (desgaste) (Cabral, 1998). No período de “vida útil” as falhas deverão ocorrer de forma aleatória com taxa de avarias constante (Didelet & Viegas, 2003). É o período de maior rendimento do equipamento.

Didelet & Viegas (2003) consideram que a primeira fase desta curva já não é observada pelo facto de muitos equipamentos hoje em dia já chegarem aos utilizadores testados e rodados com o intuito de eliminar esta fase de “mortalidade” inicial.

### 3.7.2. Manutibilidade

Define-se manutibilidade como a aptidão que determinado bem possui, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de forma a cumprir uma função solicitada, quando a manutenção é realizada utilizando procedimentos e recursos pré-estabelecidos (Norma NP EN 13306, 2007). Para Monchy (1989) representa a probabilidade de duração de uma manutenção considerada bem executada.

Consideram-se os seguintes conceitos base, o TTR (*Time To Repair*) ou Tempo Total de Reparação correspondente ao tempo entre o momento em que se deteta a avaria e o momento em que o

equipamento volta às suas condições normais de trabalho após ser reparado, e o MTTR (*Mean Time To Repair*) corresponde ao valor médio dos TTR para o equipamento em análise.

O MTTR representa a "esperança matemática" do tempo de reparação de uma dada avaria ou seja o tempo expectável ao fim do qual um equipamento se considera reparado (Didelet & Viegas, 2003), e pode ser calculado pela expressão 3.19:

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} \quad (3.19)$$

O conceito de TTR inclui os seguintes tempos (Cabral, 1998; Didelet & Viegas, 2003):

- Tempo de espera;
- Tempo gasto na deteção da avaria;
- Tempo de diagnóstico da avaria;
- Tempo de acesso ao componente avariado;
- Tempo de espera para o fornecimento da nova peça;
- Tempo de substituição ou reparação;
- Tempo de montagem;
- Tempo de controlo e arranque do equipamento.

Segundo Pinto (1994) são vários os métodos que podem ser adotados com vista à melhoria da manutibilidade. Estes métodos podem passar por reduzir o tempo de deteção e localização de avarias, com a aposta em instrumentos de medida, de meios auxiliares de diagnóstico e numa boa documentação de apoio e reduzindo o tempo de reparação, aperfeiçoando os acessos aos componentes de substituição, e aumentando a facilidade de desmontagem e montagem destes.

### **Taxa de reparação**

A taxa de reparação  $\lambda$  pode ser definida como o inverso do MTTR e é calculada pela expressão 3.20:

$$\lambda = \frac{Nr}{Tr} \quad (3.20)$$

Onde:

$Nr$  - Número de reparações

$Tr$  - Tempo total de reparação

Na figura 3.16 apresentam-se esquematizados os indicadores MTBF e MTTR.

Outros conceitos a reter são os de MDT (*Mean Down Time*) ou média dos tempos de paragem, correspondente ao tempo em que o equipamento se encontra indisponível para assegurar a função para a qual foi concebido. E o MUT (*Mean UP Time*) ou média do tempo de funcionamento, que corresponde ao tempo em que o equipamento se encontra disponível para assegurar a mesma função. Na figura 3.16 encontram-se esquematizados os indicadores MTBF, MTTR, MDT e MUT.

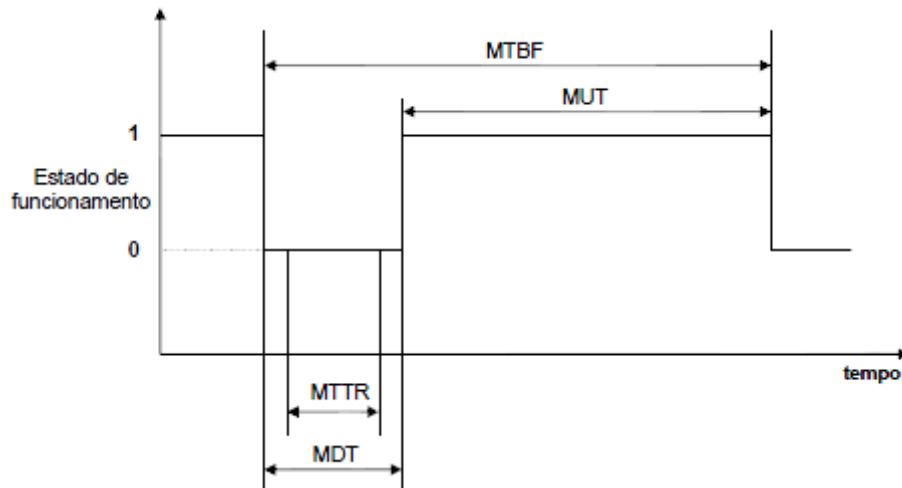


Figura 3.16 – Indicadores MTTR, MTBF, MDT e MUT

Adaptado de: Ferreira (1998)

O MDT pode ser afetado por fatores como a dimensão da avaria, o tempo de reação dos serviços de manutenção, a logística de apoio e o tempo para o fornecimento de nova peça. O MUT é interrompido por fatores como a ocorrência da falha e pelo próprio trabalho no equipamento.

### 3.7.3. Disponibilidade

Define-se disponibilidade como a aptidão de um bem para assumir a função pela qual foi concebido sob determinadas condições, num dado instante ou intervalo de tempo, tendo em conta que se encontra assegurado o fornecimento dos recursos externos necessários (Norma NP EN 13306, 2007).

Pinto (1994) define a disponibilidade como sendo a probabilidade que uma máquina tem de assegurar a função para a qual foi projetada e produzida, num determinado período de tempo.

A disponibilidade exprime-se matematicamente pela expressão 3.21:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.21)$$

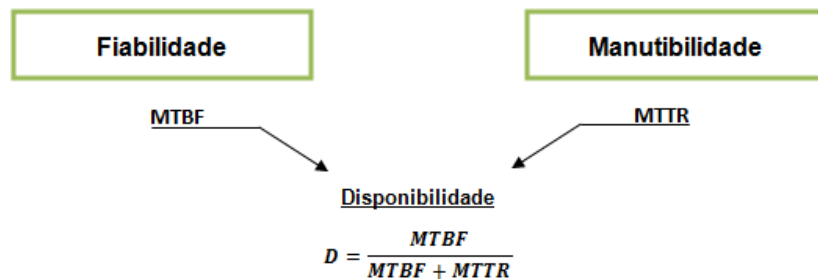
Sendo esta a expressão da Disponibilidade é de conclusão imediata de que as duas formas de aumentá-la serão através do aumento do valor do MTBF ou da diminuição do MTTR (Didelet & Viegas, 2003). A disponibilidade está dependente da fiabilidade e da manutibilidade. Aumentar a disponibilidade implica aumentar a fiabilidade dos equipamentos e reduzir a duração das intervenções, objetivo dos serviços de manutenção.

A diminuição do MTTR pode passar por suprimir algumas parcelas de tempo que compõe o TTR como o tempo de espera por indisponibilidade de técnicos, equipamentos ou ferramentas, o tempo de espera pelo fornecimento de peças assim como a eliminação de outros tempos improdutivo (Didelet & Viegas, 2003).

A disponibilidade depende (Ferreira, 1998; Didelet, 2003a):

- Do número de avarias → Fiabilidade;
- Da rapidez com que as avarias são reparadas → Manutibilidade;
- Do tipo de manutenção → Manutenção;
- Da quantidade dos meios à disposição → Logística;
- Da sua interdependência.

A figura 3.17 faz a representação da relação entre a fiabilidade e a manutibilidade e a sua influência na disponibilidade de um bem reparável (Ferreira, 1998).



**Figura 3.17 – Relação fiabilidade, manutibilidade e a disponibilidade**

**Adaptado de: Ferreira (1998)**



## CAPÍTULO 4 - ESTATÍSTICA DE FALHAS

---

Um modelo estatístico aplicado ao estudo da fiabilidade usa o conhecimento retido de situações passadas com um dado componente, equipamento ou sistema ou entidades semelhantes, de forma a tentar prever a condição futura da entidade em análise (Didelet, 2003a).

Os modelos estatísticos de fiabilidade podem ser paramétricos ou não paramétricos, os paramétricos diferem dos não paramétricos pelo facto de pretenderem ajustar uma distribuição aos tempos de avaria para uma população homogénea. Os métodos não paramétricos ao contrário dos paramétricos, não necessitam do conhecimento prévio da distribuição de probabilidade do intervalo de tempo entre falhas, constituindo desta perspetiva para O'Connor (1991) uma vantagem.

De forma a serem aplicados nas melhores condições, pois constituem os modelos mais eficientes, os modelos paramétricos exigem a verificação exaustiva das suas condições de funcionamento assim como interpretados corretamente todos os fatores que possam ter influenciado os dados em análise (Didelet, 2003a).

As distribuições estatísticas mais utilizadas são as de Poisson, exponencial negativa, normal e Weibull (Leitão, 1999). Existem ainda os modelos estatísticos estocásticos que constituem modelos pontuais que analisam avarias que se repetem no mesmo equipamento. A análise prévia de dados, através de modelos estocásticos permite verificar qual a tendência destes antes da aplicação de qualquer distribuição estatística.

As distribuições de probabilidade mais uteis no âmbito da fiabilidade são: a função fiabilidade (ou de sobrevivência), a função densidade de probabilidade e a função de risco (Kalbfleisch & Prentice, 2002).

### 4.1. Sistemas reparáveis versus sistemas não reparáveis

Um sistema reparável (SR) é todo o sistema que pode ser repostado ao serviço após ser sujeito a operações de manutenção realizadas com o intuito de eliminar qualquer irregularidade detetada, ao contrário de um sistema não reparável (SNR), que é substituído por outro igual após falhar a primeira vez, ou seja, a manutenção não é capaz de repor as funções para a qual está destinado sem substituir de forma íntegra todo o sistema (Ascher e Feingold, 1984).

Num sistema reparável a ocorrência da avaria num dos elementos que a constituem significa uma interrupção da operacionalidade não uma cessação desta.

Contudo é de notar que um sistema reparável pode também conter alguns componentes não reparáveis que têm de ser substituídos quando falham, como é o exemplo de certos componentes elétricos, parafusos, etc (O'Connor, 1991).

Quando estamos perante um sistema reparável, as reparações necessárias a deixar o sistema num estado de funcionamento desejável, consistem frequentemente na substituição ou recuperação de

uma pequena porção dos seus componentes. Estas sucessivas intervenções e substituições de componentes podem resultar numa não independência e distribuição uniforme dos tempos entre falhas (TBF), e o sistema já não será Poisson Homogéneo (PH). A quantidade de componentes que são necessários substituir aumenta com a idade de um equipamento e por outro lado, alguns componentes sofrem um envelhecimento prematuro influenciados por um conjunto envelhecido. Desta forma os TBF estarão correlacionados e evidenciarão uma progressiva diminuição, constituindo um Poisson não homogéneo (PNH) (Assis, 2013).

## 4.2. Dados censurados

Durante o tratamento de dados surge frequentemente informação censurada, devido à não observação do tempo exato de ocorrência da falha.

Perante este facto, a metodologia a utilizar deve proceder à separação de dados, tendo em conta os censurados e não censurados, com o objetivo de obter os parâmetros de forma fiável.

É então relevante a compreensão dos conceitos relativos à informação censurada, e os tipos de censura existente e que comumente se encontram nos estudos fiabilísticos.

Segundo Ryan (2007) considera-se a existência de três tipos: os dados censurados à direita, os dados censurados à esquerda e o intervalo censurado. O autor considera ainda a existência de um quarto tipo, o tempo exato de falha, em que o final do período de estudo só acaba quando corre uma falha em determinado item e desta forma os dados censurados consideram-se inexistentes. Apesar de ser um método útil, pela facilidade que acrescenta ao estudo e análise de dados, é pouco utilizado pois por se aguardar o momento em que o item falha acomoda um número elevado de variáveis.

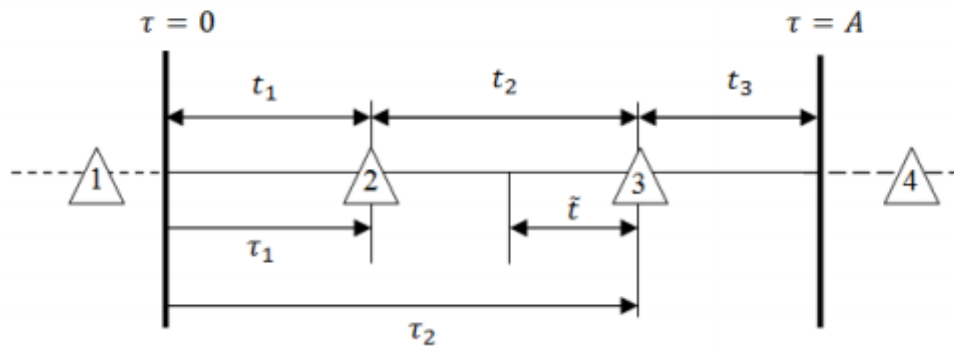
Considera-se a censura Tipo I, os dados censurados que se apresentam à direita, ou seja o estudo cessa ainda se encontrando o item em operação, desta forma o instante em que voltará a falhar será desconhecido (Ryan, 2007). Perante uma situação com censura à direita, deve assumir-se que os itens que não constam do estudo, são tão representativos quanto os restantes. Segundo Allison (2010) este é tipo de censura mais usado industrialmente, por ser difícil em termos operacionais e financeiros monitorizar o processo até à última falha.

Considera-se censura Tipo II, quando os dados censurados se apresentam à esquerda pelo que antes de se iniciar o estudo, já ocorreram falhas nos itens (Ryan, 2007).

O intervalo censurado compreende o intervalo de tempo que inicia com o item em funcionamento e finda aquando da ocorrência de falha (Ryan, 2007). A figura 4.1 esquematiza os diversos tipos de dados censurados supracitados, permitindo um melhor entendimento destes.

Considerando um período de estudo  $T$  compreendido entre o instante de término do estudo  $\tau_A$  e o instante inicial  $\tau_0$ , e representando cada triângulo uma falha ocorrida em determinado instante tanto desse período como fora dele, é de notar que a falha 1 ocorreu antes do início do estudo e que a falha 4 ocorreu após esse período. Sendo que a falha 2 é a primeira a ser considerada no ensaio, já

tendo acontecido a falha 1 anterior a  $\tau = 0$ , pode concluir-se que o valor  $t_1 = (\tau_1 - \tau_0)$  é censurado à esquerda, sendo por isto um dado censurado do Tipo II (Dias, 2002).



**Figura 4.1 – Dados censurados**

**Adaptado de: Dias (2002)**

Na mesma linha de pensamento, o valor  $t_3 = (\tau_A - \tau_2)$  não considera a falha ocorrida após o instante final de observações  $\tau_A$  (falha 4), pelo que é censurado à direita, logo do Tipo I (Dias, 2002).

O intervalo censurado é representado por  $\tilde{t}$ , inicia-se com o item em plena operação e cessa com a ocorrência de falha, neste caso a falha 3.

### 4.3. Indicadores de desempenho da fiabilidade

#### 4.3.1. Função fiabilidade ou sobrevivência

A função fiabilidade é expressa através da probabilidade do equipamento não falhar num certo período de tempo  $[0, t]$ , e por isto é função do tempo e representa-se por  $R(t)$ . A probabilidade de falha nesse mesmo período  $t$  é dada pela função de distribuição cumulativa representada por  $F(t)$  (Didelet & Viegas, 2003).

Seja  $T$ , a variável aleatória, não negativa ( $T \geq 0$ ), correspondente ao tempo até avaria, a função fiabilidade pode então ser definida, para valores contínuos e discretos, como a probabilidade de  $T$  ser maior ou igual um determinado valor de  $t$  e a função de distribuição cumulativa  $F(t)$  como a probabilidade desta variável ser menor que o valor de  $t$  definido.

Temos então:

$$R(t) = \text{Prob}(T \geq t) \quad 0 < t < \infty \quad (4.1)$$

$$F(t) = \text{Prob}(T < t) \quad (4.2)$$

Visto que os dois estados se complementam, pode escrever-se:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (4.3)$$

Seja  $f(t)$  a função densidade de probabilidade de falha, definida por:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.4)$$

Teremos:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (4.5)$$

ou

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (4.6)$$

e

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (4.7)$$

### 4.3.2. Função de risco

A função de risco  $h(t)$  representa a probabilidade de determinado componente falhar num intervalo de tempo  $t + \Delta t$ , partindo do pressuposto que até ao instante  $t$  o sistema nunca falhou.

A expressão da função de risco é dada por:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} \right) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (4.8)$$

Torna-se útil relacionar a fiabilidade do sistema com a função de risco. A expressão da função fiabilidade  $R(t)$  a partir da função de risco pode desenvolver-se da seguinte maneira:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{R(t)} \frac{1}{dt} \quad (4.9)$$

Obtém-se:

$$h(t) = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (4.10)$$

Expressão que integrada em ordem ao tempo:

$$\int h(t) dt = -d \int \ln R(t) \quad (4.11)$$

Sendo:

$$H(t) = -\ln R(t) \quad (4.12)$$

Temos então a expressão geral da fiabilidade:

$$R(t) = e^{-\int h(t)dt} = e^{-H(t)} \quad (4.13)$$

Se  $h(t)$  for constante, dada por uma taxa de falhas constante  $\lambda$  é rapidamente concluído que a expressão da fiabilidade passa a ser dada por:

$$R(t) = e^{(-\lambda \times t)} \quad (4.14)$$

A taxa de falhas não deve ser confundida com a função de risco (ou taxa instantânea de falhas)  $h(t)$ . Segundo Assis (2013) a taxa de falhas é uma probabilidade incondicional de ocorrência de uma falha num intervalo  $\Delta t$ , referindo-se à taxa absoluta de falha dos sistemas reparáveis e  $h(t)$  uma probabilidade condicional de certa falha acontecer no intervalo  $\Delta t$  dado o facto de até ao momento  $t$  não ter ocorrido nenhuma, referindo-se por isto, somente à primeira falha.

Embora o conceito de taxa de avarias não possa ser aplicado a sistemas/componentes não reparáveis considerados isoladamente, podem aplicar-se ambos a sistemas reparáveis.

A taxa de avarias associada a acontecimentos repetitivos em que a contagem do seu tempo referência se faz a partir da entrada em funcionamento até ao momento presente e a função de risco a um acontecimento único que tem por base o tempo passado desde a última avaria até ao presente (Didelet, 2003a).

#### 4.4. Estimador não paramétrico da função fiabilidade

O estimador limite-produto, ou Kaplan-Meier, é um estimador não-paramétrico para a função de fiabilidade (Kaplan & Meier, 1958).

Numa amostra de dimensão  $n$ , correspondente a uma população homogénea, com função de fiabilidade  $R(t)$ , considere-se o tempo observado desde a ultima falha dado por  $t_1 < t_2 < t_k$  (Kaplan & Meier, 1958).

Na presença de dados censurados conhecidos  $t_{jl}$ , a função de máxima verosimilhança, é dada pela expressão:

$$L = \prod_{j=0}^k \left\{ [R(t_j) - R(t_j + \Delta t)]^{d_j} \prod_{l=1}^{m_j} R(t_{jl} + \Delta t) \right\} \quad (4.15)$$

A função fiabilidade estimada é descontínua nos pontos onde se observam falhas, considera-se então que  $t_{jl} \geq t_j$ .  $R(t_{jl} + \Delta t)$  maximiza-se através da operação:

$$R(t_{jl} + \Delta t) = R(t_j + \Delta t) \quad (4.16)$$

e

$$R(t_{0l}) = 1 \quad (4.17)$$

Representando  $R(t_j)$  a fiabilidade dos sistemas não falharem em  $t_j$ , a probabilidade de falha é dada por:

$$h_j = \frac{f(t_j)}{R(t_j)} \quad (4.18)$$

O estimador Kaplan-Meier  $\hat{R}(t)$ , discreto em  $t_j$ , maximiza a função  $L$ , e é representado pela expressão (Kaplan & Meier, 1958):

$$\hat{R}(t) = \prod_{j|t_j < t} \left( \frac{n_j - d_j}{n_j} \right) \quad (4.19)$$

## 4.5. Análise de tendência

Antes da aplicação de uma qualquer distribuição estatística, quando dispomos de um histórico de dados reais relativos às avarias ordenados cronologicamente, é fundamental proceder à sua análise comportamental, devendo-se analisar a tendência dos dados sob o ponto de vista do processo estocástico (Leitão, 1999).

A análise de tendência é um processo de inferência estatística, que recorre a testes de hipóteses de forma a verificar se os dados amostrais são ou não compatíveis com determinadas populações.

A análise estatística da ordem cronológica das falhas permite concluir para um determinado nível de significância, se o sistema reparável em análise se comporta segundo um Processo Poisson Homogéneo (PPH) ou segundo um Processo Poisson Não Homogéneo (PPNH), verificando assim se a taxa de falhas é constante ou apresenta alguma tendência (Dias *et al.*, 2007).

Sistemas com tendência podem ser analisados a partir do Modelo de Crow.

Segundo Ascher e Feingold (1984) o teste de Laplace é o mais comumente utilizado, neste tipo de verificações de análise tendencial, e por isso descrito neste estudo.

### 4.5.1. Teste de Laplace

O teste de Laplace é utilizado sempre que se pretende verificar umas das seguintes situações (Didelet, 2003b):

- Se determinado modo de falha é Independente e Identicamente Distribuído (IID), ajustando-se posteriormente a uma distribuição estatística;
- Se a taxa de avarias de determinado sistema é constante.

São vários os autores ao longo da literatura que dão uso a este modelo para verificar se as amostras utilizadas apresentam comportamentos homogéneos.

A teste de Laplace permite concluir, como já anteriormente referido, para um determinado nível de significância, se o sistema reparável se comporta segundo um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) ou, se segue um Processo de Poisson não Homogéneo (PPNH).

Temos então as hipóteses:

$H_0$ : Taxa de avarias constante (PPH)

$H_1$ : Taxa de avarias crescente ou decrescente (PPNH)

No pressuposto de um PPH, sabe-se que a estatística teste  $Z_0$  é distribuída segundo a distribuição Normal reduzida, com médio zero e variância unitária e pode ser obtida a partir da expressão (Dias *et al.*, 2007; Didelet, 2003b):

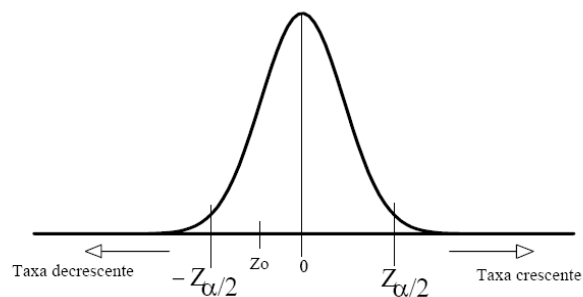
$$Z_0 = \sqrt{12 \times n_f} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i}{n_f T} - 0,5 \right] \quad (4.20)$$

No caso de o teste ser limitado pelo tempo. Sendo  $n_f$  correspondente ao número de falhas,  $T$  o tempo de observação do sistema e  $\tau$  a idade do sistema no momento da falha  $i$ .

Se o teste for limitado pelo número de avarias (Didelet, 2003b):

$$Z_0 = \sqrt{12(n_f - 1)} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_f-1} \tau_i}{(n_f - 1)T} - 0,5 \right] \quad (4.21)$$

Os valores da estatística teste  $Z_0$  deverão situar-se dentro do intervalo de confiança  $([-Z_{\alpha/2}; Z_{\alpha/2}])$ , no pressuposto de um PPH. Valores negativos, fora do intervalo indicam a presença de PPNH com taxa de falhas decrescente e valores positivos, fora do intervalo, uma taxa de falhas crescente (Dias *et al.*, 2007), como se apresenta na figura 4.2.



**Figura 4.2 - Distribuição normal reduzida**

## 4.5.2. Processos Estocásticos Pontuais

### Processo de Poisson Homogéneo

Um processo de Poisson homogéneo, é uma sequência infinita de tempos entre avarias, independentes e distribuídos de forma exponencialmente idêntica, caracterizado por possuir uma taxa de falhas  $\lambda$  constante.

De acordo com Ascher e Feingold (1984) um processo estocástico pontual  $\{N(t), t \geq 0\}$  diz-se um PPH se :

- $N(0) = 0$
- $\{N(t), t \geq 0\}$  é aumentado de forma independente
- O número de avarias em qualquer intervalo  $\Delta t$  segue uma distribuição de Poisson de valor médio:  $m = \lambda_0 \times \Delta t$

A probabilidade de ocorrência de  $n_f$  falhas num determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , é dada pela expressão 4.22:

$$P\{N(\Delta t) = n_f\} = \frac{e^{-m} m^{n_f}}{n_f!} \quad (4.22)$$

A fiabilidade do sistema reparável, num período de tempo  $\Delta t$  pode então ser determinada pela equação 4.23, com a probabilidade de  $n_f$  igual a zero falhas:

$$R(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} \quad (4.23)$$

### Processo de Poisson Não Homogéneo – PPNH

A diferença entre um PPH e um PPNH é o facto deste último não ter uma taxa de falhas constante. Um PPNH caracteriza-se por uma taxa de falhas dependente do tempo, ou seja, apresenta tendência nos seus dados. Se os intervalos de tempo entre falhas diminuïrem estamos perante um sistema reparável com uma taxa de falhas crescente, por outro lado, um aumento no intervalo de tempo entre falhas denuncia um sistema reparável com uma taxa de falhas decrescente.

O PPNH pode modelar por isso situações que apresentem degradação (taxa de falhas aumenta) ou melhoria dos equipamentos (taxa de falha diminui) (Didelet, 2003b).

Um PPNH com taxa de falhas crescente, indica a presença de componentes com função de risco também ela crescente. Esta situação tem de ser analisada tendo em conta a frequência de falhas dos componentes que avariam, nomeadamente a frequência de avarias do componente com maior frequência de avarias, e quando justificável recorrer ao Modelo de Riscos Proporcionais para verificar qual o componente com maior risco de falha (Kalbfleisch & Prentice, 1980).

#### 4.6. Modelo de Crow

O modelo desenvolvido por Crow (1974) constitui uma reformulação do modelo de Duane. O modelo de Crow permite estimar a taxa de falhas quando esta apresenta uma tendência, ou seja quando estamos perante equipamentos que se comportam como um PPNH.

$$\rho(\tau) = \hat{\lambda} \times \hat{\beta} \times \tau^{\hat{\beta}-1} \quad (4.24)$$

Sendo  $\hat{\lambda}$  e  $\hat{\beta}$  as estimativas da constante do modelo e  $\tau$  o tempo de duração do teste. Os valores de  $\hat{\lambda}$  e  $\hat{\beta}$  podem ser facilmente obtidos através da função de máxima verosimilhança.

Para dados censurados por tempo, as estimativas Sendo  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\lambda}$  são dadas pelas expressões 4.25 e 4.26 respetivamente:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln\left(\frac{T}{\tau_i}\right)} \quad (4.25)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^{\hat{\beta}}} \quad (4.26)$$

Onde  $\tau_i$  corresponde ao tempo de vida da falha no instante  $i$  e  $n_f$  ao número total de falhas verificadas no período de teste  $T$ .

Se o teste for limitado pelo número de falhas, as estimativas  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\lambda}$  são determinadas pelas expressões 4.27 e 4.28 respetivamente:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f-1} \ln\left(\frac{T_{n_f}}{\tau_i}\right)} \quad (4.27)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T_{n_f}^{\hat{\beta}}} \quad (4.28)$$

Com  $T_{n_f}$  correspondente ao tempo total do teste, cessado pela ocorrência da última falha.

Não sendo os tempos entre falhas constantes, não é possível calcular o MTBF, recorrendo-se ao denominado tempo cumulativo médio entre falhas (CMTBF).

A estimativa do valor do CMTBF é dada a partir da expressão 4.29:

$$\hat{\theta} = \frac{1}{\rho(\tau)} = \frac{1}{\hat{\lambda} \times \hat{\beta} \times \tau^{\hat{\beta}-1}} \quad (4.29)$$

E determina-se o intervalo de confiança do valor de CMTBF estimado através das expressões 4.30 (limite inferior) e 4.31 (limite superior):

Limite Inferior:

$$\hat{\theta}_i(\tau) = \hat{\theta}(\tau) \times \pi_1 \quad (4.30)$$

Limite Superior:

$$\hat{\theta}_s(\tau) = \hat{\theta}(\tau) \times \pi_2 \quad (4.31)$$

Os valores das constantes  $\pi_1$  e  $\pi_2$  obtêm-se diretamente da tabela em Anexo 1. Caso de trate de um teste limitado pelo número de falhas a única diferença nas equações 4.30 e 4.31 é a representação

das constantes anteriores, que passam a ser representadas por  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , cujos valores se encontram também tabelados em Anexo 1.

## 4.7. Distribuição Weibull

A distribuição de Weibull, desenvolvida por um físico sueco, Ernest Hjalmar Wallodi Weibull em 1939, foi desenvolvida com o intuito de modelar a dureza dos materiais, prevendo o comportamento destes à fadiga (Rausand & Høyland, 2004).

Caracterizada por ter uma grande versatilidade na descrição do tempo de vida até falha de componentes sujeitos a fenômenos de degradação, a função de Weibull é frequentemente usada como distribuição de probabilidade de falhas, modelando os tempos de vida dos componentes.

A estimativa dos parâmetros da distribuição, para os tempos de vida em análise, é obtida pelo método da máxima verosimilhança (Assis, 2010; Dias *et al.*, 2007).

As funções densidade de probabilidade, de fiabilidade e de distribuição de probabilidade, para um componente cujos tempos de falha podem ser modelados pela distribuição de Weibull, serão apresentados pelas expressões que se descrevem a seguir (Dias *et al.*, 2007).

### 4.7.1. Função densidade de probabilidade

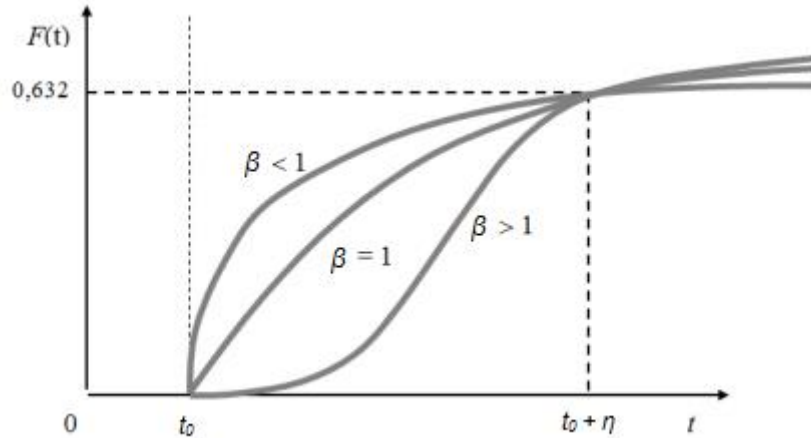
Seja  $t$  o tempo, ciclo de vida ou qualquer medida descritiva de duração de vida a função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull de três parâmetros é dada pela expressão:

$$f(t|t_0, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \times \left[ \frac{t - t_0}{\eta} \right]^{\beta-1} \times e \left[ -\left( \frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right], t \geq t_0 \quad (4.32)$$

Os parâmetros  $t_0$ ,  $\eta$  e  $\beta$  da distribuição Weibull  $(t_0, \eta, \beta)$ , têm as seguintes definições:

- Parâmetro de localização:  $t_0 \geq 0$ , corresponde ao menor valor de  $t$ ;
- Parâmetro de forma:  $\beta > 0$ , corresponde ao mecanismo de degradação;
- Parâmetro de escala:  $\eta > 0$ , corresponde à vida característica em fiabilidade.

Como demonstrado na figura 4.3, a vida característica é um tempo associado a uma probabilidade de avaria de 63,2%, ou seja, corresponde ao tempo ao fim do qual a probabilidade de falha atinge esse valor percentual, continuando os restantes 36,8% em condições de funcionamento (Didelet, 2003b).



**Figura 4.3 – Função de probabilidade acumulada de Weibull para vários valores de  $\beta$**

**Adaptado de: Assis (2010)**

O parâmetro de forma  $\beta$ , também designado por inclinação-Weibull, representa a inclinação da sua função densidade de probabilidade. Desta forma, a variação deste parâmetro implica a alteração da forma da função densidade de probabilidade (Rinne, 2009).

#### 4.7.2. Função fiabilidade

A função acumulada de probabilidade  $F(t)$ , é obtida através da integração da equação 4.32, entre  $t_0$  e  $t$  (equação 4.33):

$$F(t|t_0, \eta, \beta) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (4.33)$$

Logo a função fiabilidade é dada pela equação 4.34:

$$R(t|t_0, \eta, \beta) = 1 - F(t|t_0, \eta, \beta) = e^{\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right]} \quad (4.34)$$

#### 4.7.3. Função de risco

Sabe-se que a função de risco se obtém através da seguinte divisão (equação 4.35):

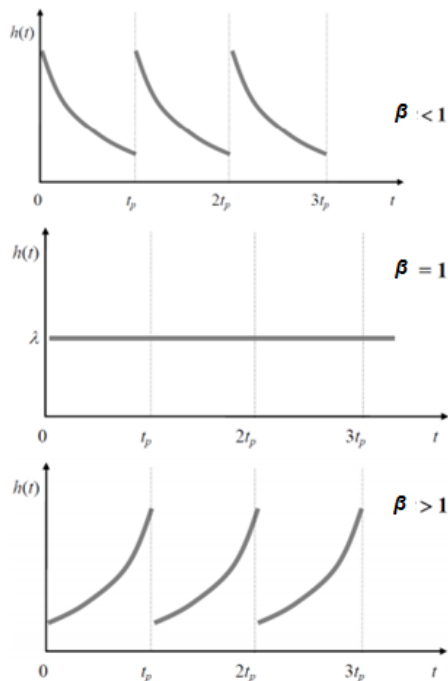
$$h(t|t_0, \eta, \beta) = \frac{f(t|t_0, \eta, \beta)}{R(t|t_0, \eta, \beta)} \quad (4.35)$$

Pelo que, com a sua simplificação, a função de risco se traduz na seguinte equação (4.36):

$$h(t|t_0, \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4.36)$$

Como é conclusivo a partir da análise figura 4.4, representativa da evolução da função de risco  $h(t)$  de um componente cuja lei de falha pode ser caracterizada pela função Weibull e que é substituído preventivamente após um acumular de  $t_p$  horas de operação:

- Quando  $\beta < 1$ ,  $h(t)$  cresce rapidamente, pois potencia-se o aparecimento de falhas;
- Quando  $\beta = 1$ ,  $h(t)$  mantém-se constante e igual à taxa de falha, o mesmo acontece com a probabilidade de falha, pelo que se torna útil a substituição preventiva;
- Quando  $\beta > 1$ , e se procede à substituição preventiva, a função de risco  $h(t)$  decresce, reduzindo a probabilidade de falha.



**Figura 4.4 - Evolução esperada de  $h(t)$  de um componente substituído preventivamente**

**Adaptado de: Assis (2010)**

Didelet (2003b) assume a grande importância da distribuição de Weibull em trabalhos de fiabilidade, constituindo esta uma vantagem pelo ajustamento que permite a outras distribuições de tempos de vida típicos, através da modificação dos seus parâmetros, nomeadamente o parâmetro de forma.

Permitindo o ajustamento a várias distribuições, a função de Weibull tem assim várias características relevantes (Assis, 2010):

- Quando  $t_0 = 0$  e  $\beta = 1$ , a função de risco  $h(t)$  é constante e  $f(t)$  segue uma distribuição Exponencial;
- Quando  $\beta < 1$ , a função de risco  $h(t)$  é decrescente e  $f(t)$  aproxima-se de uma distribuição Gamma;
- Quando  $\beta > 1$ , a função de risco  $h(t)$  é crescente e  $f(t)$  aproxima-se de uma distribuição Normal se  $\beta = 3,5$  e de uma distribuição Log-Normal caso o valor de  $\beta = 2$ .

## CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

---

O AMBIGROUP representa um grupo de empresas ligadas ao setor ambiental, responsáveis pelo tratamento e reciclagem de um fluxo específico de resíduos, contando com mais de uma década de *know how* na sua gestão (AMBIGROUP, 2015).

Com génese no ano de 1978, iniciou a sua atividade na recolha e venda de sucatas. Anos depois com a especialização nesta área alargou o seu negócio a novas atividades no domínio do desmantelamento, demolições e gestão de outros tipos de resíduos não metálicos. Em Janeiro de 2004, surge a *holding* AMBIGROUP SGPS, S.A. com vista à consolidação das diversas atividades do grupo (AMBIGROUP, 2015).

O grupo obtém taxas de reciclagem na ordem dos 89% e de valorização à volta dos 9%, evitando desta forma a deposição de resíduos em aterros. Sempre na vanguarda da gestão ambiental, o AMBIGROUP destaca-se pelo seu cariz pró-ativo e de inovação procurando soluções cada vez mais eficientes na reciclagem e valorização de resíduos (AMBIGROUP, 2015).

O AMBIGROUP presta vários tipos de serviços, sendo constituído por diversas empresas. A estrutura organizacional do grupo encontra-se representada pela figura 5.1.

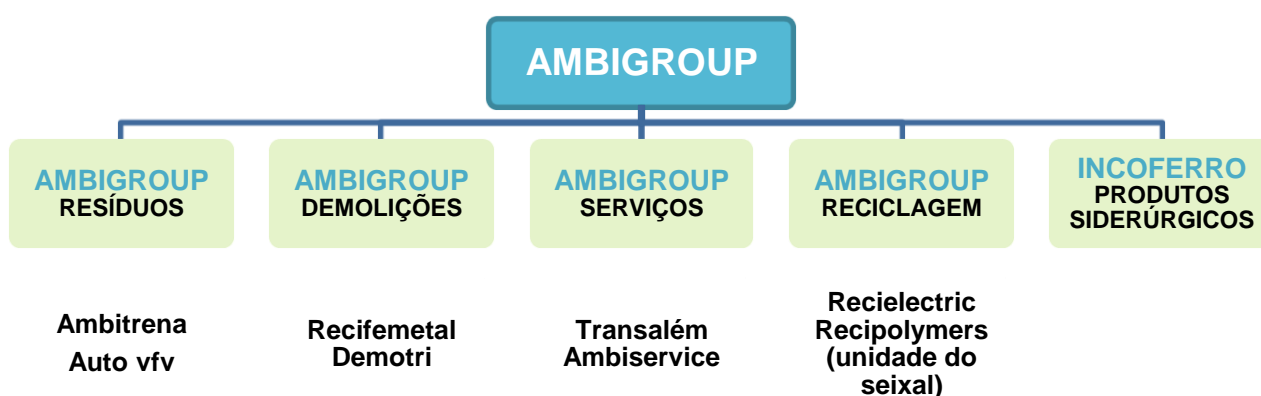


Figura 5.1 – Estrutura da AMBIGROUP em Portugal

Adaptado de: AMBIGROUP (2015)

Atualmente os seus serviços não se encontram limitados ao território nacional, numa lógica de competitividade o grupo detém várias unidades de tratamento e reciclagem espalhadas por todo o país, mas também conta com uma forte presença em Espanha (atividades de demolições e desmantelamentos) (AMBIGROUP, 2015).

## 5.1. Recielectric

A Recielectric, representada na figura 5.2, destaca-se como uma empresa do grupo AMBIGROUP SGPS, S.A., focada no tratamento de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrónicos, a laborar desde Julho de 2007, visa dar resposta nacional à necessidade de tratamento deste tipo de resíduos, contando com mais de 50 trabalhadores.



**Figura 5.2 - Recielectric**

Localizada no Casal do Marco, Seixal, a Recielectric constitui um centro de receção e Unidade de Tratamento e Valorização (UTV) dos principais fluxos de equipamentos que constituem os REEE, ao mesmo tempo que tenta garantir que todo o processo é feito zelando pela minimização dos impactos ambientais (AMBIGROUP, 2011).

Esta unidade encontra-se licenciada e certificada para rececionar e efetuar as várias etapas necessárias ao tratamento deste tipo de resíduos. Apresenta-se como uma unidade empresarial integrada, tecnologicamente avançada, ambientalmente e economicamente sustentável, que contribui para a gestão de resíduos de EEE feita em Portugal, ao nível do seu tratamento e valorização. Assegura a redução da nocividade dos resíduos, empregando tecnologias limpas através das quais procede à reutilização de resíduos e valorização para reciclagem de acordo com as legislativas em vigor (AMBIGROUP, 2011).

Segundo dados recolhidos na empresa, em 2010 foram processados cerca de 50000 unidades de equipamentos de frio em fim de vida (frigoríficos e arcas congeladoras), cerca de 2500 toneladas (AMBIGROUP, 2011).

Focada no ambiente e por isso na redução do desgaste da camada de ozono, uma das operações de tratamento efetuadas e por isso das de maior relevância é a recolha de gases nocivos para o ambiente e que por isso empobrecem a camada de ozono (ODS). Neste tipo de equipamentos estes gases encontram-se essencialmente no circuito de refrigeração e na espuma de isolamento. A atividade da Recielectric orienta-se pela prevenção e redução da nocividade destes resíduos (AMBIGROUP, 2011).

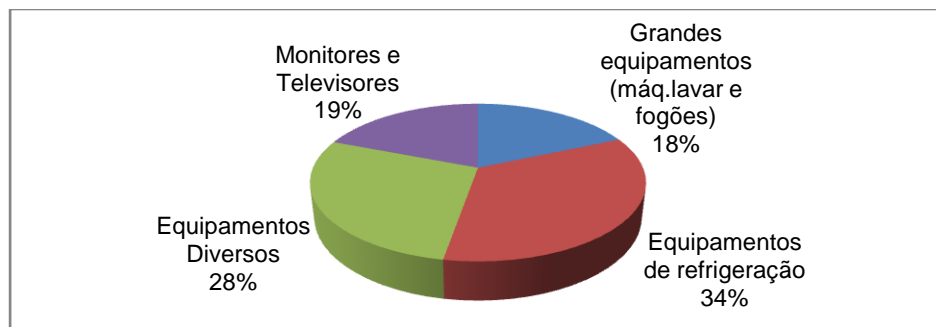
No início da sua atividade, em 2007, 70% dos equipamentos tratados na Recielectric eram portadores de CFC e HCFC (Hidro-Cloro-Flúor-Carbono), gases com elevado efeito de estufa, e destruidores da camada do ozono. Atualmente somente os mais antigos são alvo desta preocupação, numa

percentagem bastante mais satisfatória de 8%. Contudo, os equipamentos mais recentes apesar de já não possuírem gases com esta vertente ODS contêm gases que provocam efeito de estufa, como é o caso dos HFC (Hidro-Flúor-Carbono) e dos HC (Hidrocarboneto) (AMBIGROUP, 2011).

A Recieletric é constituída por 7 linhas operacionais:

- Linha 1- Linha de pré-descontaminação;
- Linha 2 – Descontaminação fase 1 de frigoríficos;
- Linha 3 – Tratamento de frigoríficos;
- Linha 4 – Desmantelamento de monitores e televisores;
- Linha 6 – Separação de vidro de monitores e televisores;
- Linha 7 – Desmantelamento de fotocopiadoras;
- Linha 13 – Descontaminação de ar-condicionado.

A distribuição por categorias de REEE que dão entrada em média na Recieletric encontram-se representados na figura 5.3.



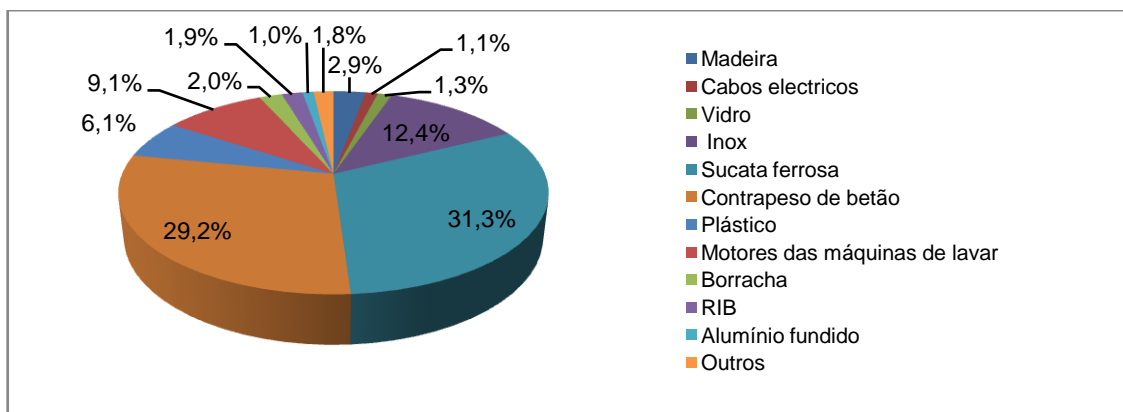
**Figura 5.3 - Distribuição por categorias de EEE recebidos na Recieletric**

A grande maioria de equipamentos recebidos são equipamentos de refrigeração (34%). Após a receção de cada equipamento, este é devidamente triado e são-lhe retirados todos os cabos elétricos e componentes amovíveis. É então acondicionado em contentores e encaminhado para a linha operacional corresponde à sua categoria.

#### **Grandes eletrodomésticos:**

Os grandes eletrodomésticos, como as máquinas de lavar e fogões, são reduzidos a frações através de processos de desmantelamento e separação dos seus componentes para posterior encaminhamento para reciclagem.

As frações resultantes dos grandes eletrodomésticos encontram-se representadas na figura 5.4.



**Figura 5.4 – Frações resultantes dos grandes eletrodomésticos**

### Equipamentos de refrigeração:

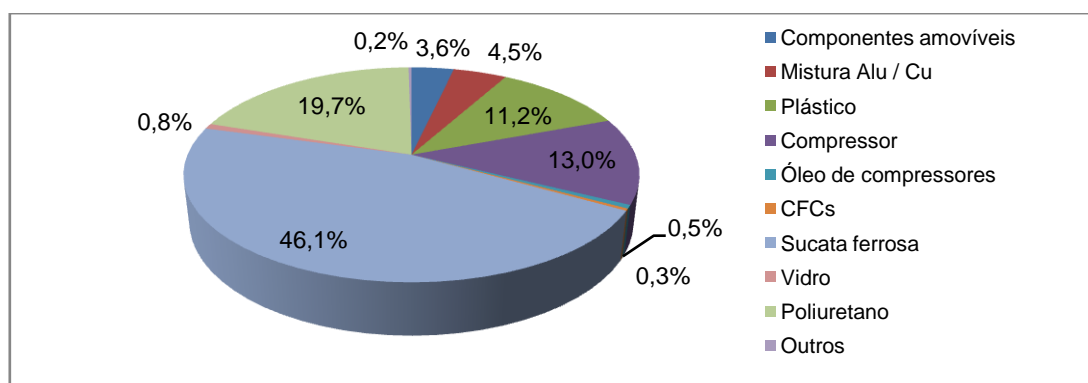
Os equipamentos de refrigeração depois de lhes retirados todos os componentes amovíveis (gavetas, prateleiras, cabos elétricos, lâmpadas, interruptores etc..) são armazenados e posteriormente encaminhados para uma linha de pré-descontaminação onde por meio de vácuo lhes é extraído o óleo do circuito de refrigeração, desmontado o compressor, circuito exterior e outros componentes.

O óleo é então separado do gás de refrigeração através de ultrassons, garantindo um nível de CFC's neste muito baixo, e é encaminhado para reciclagem (circuito de reciclagem de óleos usados). Os gases são armazenados em botija e enviados posteriormente para eliminação através de inceneração.

A carcaça do frigorífico é encaminhada para a linha de trituração, num ambiente controlado por injeção de azoto, onde se procede à separação mecânica das suas frações materiais (metais ferrosos, espuma de isolamento, plásticos e metais não ferrosos).

Os gases contidos na espuma de isolamento são recuperados por condensação e armazenados em botijas de 750 kg, sendo também posteriormente enviados para eliminação por inceneração.

As frações resultantes dos equipamentos de refrigeração encontram-se representadas na figura 5.5.



**Figura 5.5 – Frações resultantes dos equipamentos de refrigeração**

### Equipamentos elétricos e eletrônicos diversos:

Os equipamentos elétricos e eletrônicos diversos começam por ser triados e pré-descontaminados sendo removidos todos os cabos elétricos, condensadores, pilhas, tinteiros e vidro que contém. Posteriormente são alvo de separação manual, onde são removidos alguns dos seus componentes como motores, condensadores, placas de circuito impresso etc.. intercalada com separação do tipo mecânica dos diversos materiais que os compõem como metais ferrosos e não ferrosos ou plásticos.

Alguns equipamentos são desmantelados manualmente para garantir frações finais mais puras que as obtidas através de fragmentação mecânica.

### Monitores e televisores:

Nos monitores e televisores as diversas frações são desmanteladas manualmente. O tubo de raios catódicos é aberto por métodos térmicos na linha de descontaminação, e após isso é extraída através de aspiração a camada luminescente e separado o vidro da parte traseira (vidro com chumbo) do vidro frontal (vidro sem chumbo).

As frações resultantes dos monitores e televisores encontram-se representadas na figura 5.6.

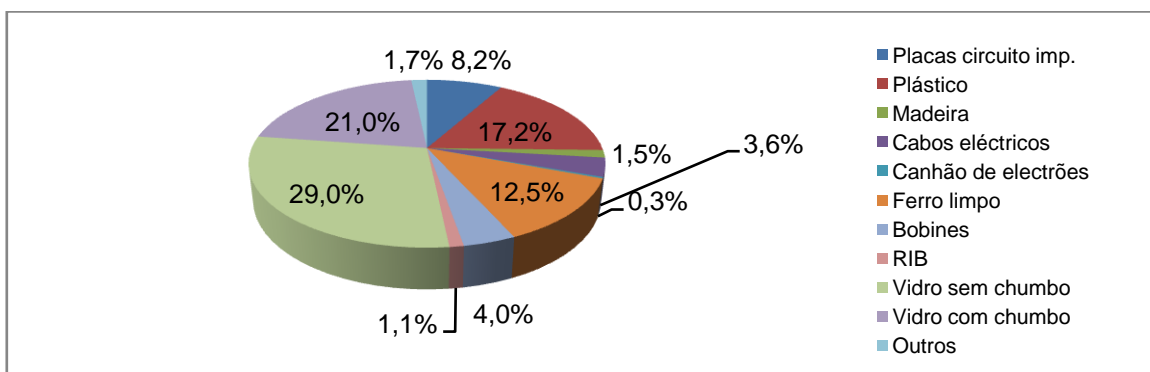


Figura 5.6 – Frações resultantes de monitores e televisores

## 5.2. Linha de produção 3

A proposta feita pelo Engenheiro da empresa foi a da restrição do projeto à linha 3 representada na figura 5.7, responsável pelo tratamento de frigoríficos em fim de vida, com o intuito de melhorar a capacidade de produção da mesma.

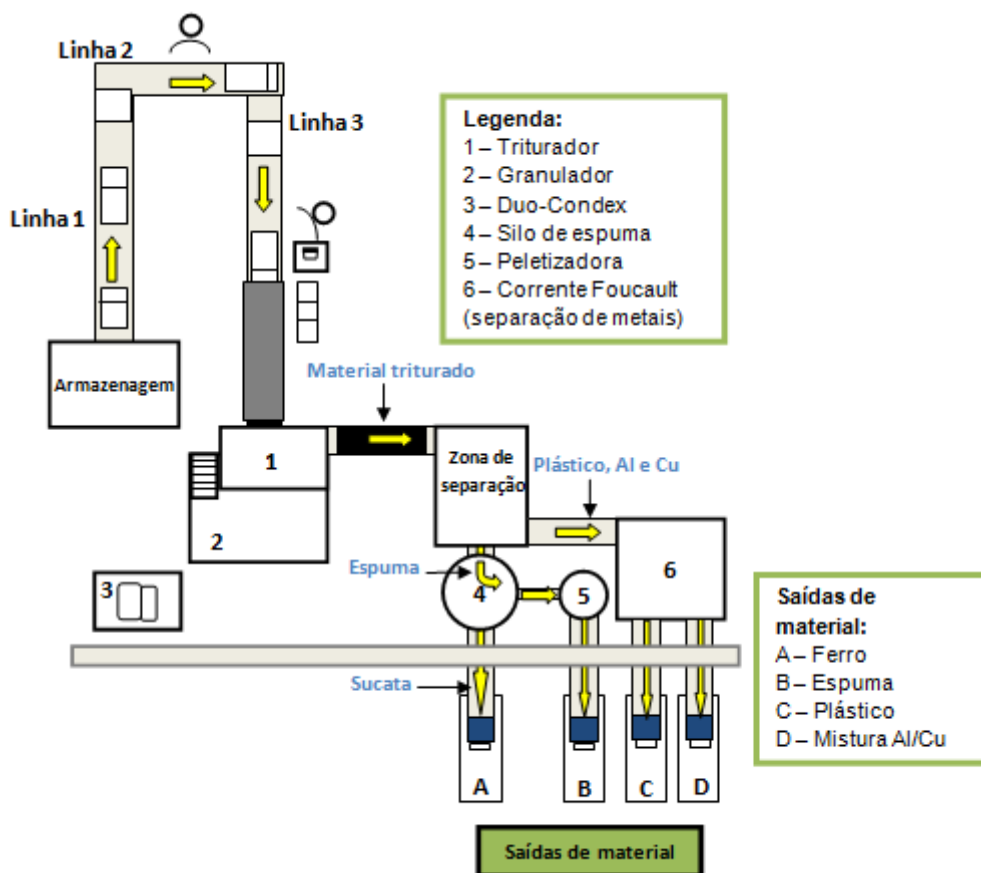


**Figura 5.7 – Representação da linha 3 em funcionamento**

Esta preocupação deve-se ao facto desta linha ser a mais crítica da empresa a nível de paragens que comprometem o seu bom funcionamento e por isso uma menor produção, uma maior exposição de agentes nocivos ao ambiente, nomeadamente quando a falha exija uma manutenção com abertura de zonas onde existem estes gases em circulação, e um maior tempo de inatividade e por isto menor rentabilidade.

### 5.2.1. *Layout da linha 3*

A linha de tratamento 3 é composta por uma série de equipamentos necessários ao seu funcionamento e produção. Na figura 5.8 é feita a representação do *layout* da linha 3, responsável pelo tratamento de equipamentos de frio.



**Figura 5.8 – *Layout* da linha 3**

A listagem dos principais equipamentos da linha assim como as funções correspondentes a cada um encontram-se listadas na tabela 5.1.

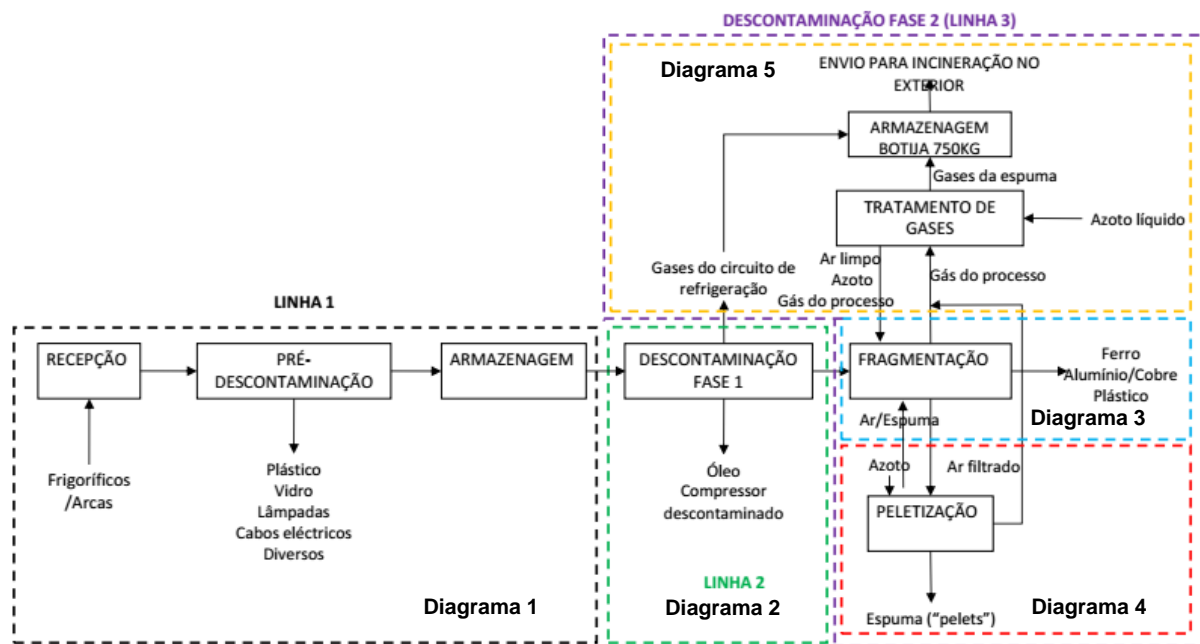
**Tabela 5.1 – Listagem dos principais equipamentos que compõe a linha 3**

<b>Equipamento</b>	<b>Função/descrição</b>
<b>Triturador</b>	Trituração do material proveniente do tapete principal – equipamentos de frio
<b>Sensor de pentano</b>	Deteção da presença de pentano para posterior alarme
<b>Sensor CO</b>	Deteção da presença de CO
<b>Granulador</b>	Reduz o material proveniente de trituração (tamanho é reduzido a 20 mm)
<b>Overband</b>	Separação magnética
<b>Corrente Foucault</b>	Separação do plástico da mistura Al/Cu
<b>Criocondensador Duo-Condex</b>	Captura de gases refrigerantes
<b>Ventiladores axiais do pré-arrefecimento G0.3</b>	Aspirar o ar para que este atravesse os radiadores promovendo o arrefecimento a temperatura ambiente dos gases do processo
<b>Sobre pressor de deslocamento positivo</b>	Realiza o deslocamento dos gases através de todo o sistema de tratamento
<b>Chiller</b>	Arrefecer água a 2°C para arrefecer e retirar humidade dos gases de processo a tratar
<b>Instalação azoto líquido</b>	Armazenamento de azoto líquido e abastecimento de azoto líquido e gasoso ao processo
<b>Peletizadora</b>	Transformar a espuma em peletes para maximizar a extração de gás da espuma

### **5.2.2. Descrição do processo**

As operações efetuadas ao longo da linha 3, assim como das linhas envolvidas no processo de tratamento dos equipamentos de frio encontram-se ilustradas na figura 5.9.

Antes de alcançarem a linha 3 os equipamentos de frio passam inicialmente pela linha 1, onde são pré-descontaminados e seguidamente pela linha 2, representadas pelos diagramas 1 e 2 respetivamente, da figura 5.9. Nesta fase são recolhidos os gases CFC, HCFC, HFC ou hidrocarbonetos (dependendo da data de fabricação do equipamento) e o óleo presentes no circuito de refrigeração. O equipamento fica então desprovido de motor (compressor), e este é reencaminhado para reciclagem. Os principais processos envolvidos na linha 3 encontram-se representados pelos diagramas 3, 4 e 5, e dizem respeito à fragmentação, peletização e tratamento de gases respetivamente.



**Figura 5.9 – Principais processos envolvidos no tratamento dos equipamentos de frio**

Seguidamente proceder-se-á a uma descrição mais pormenorizada dos principais processos envolvidos no tratamento dos equipamentos de frio, representados na figura 5.9 pelos vários diagramas 1, 2, 3, 4 e 5.

#### **Linha 1 - Diagrama 1 (Pré-descontaminação):**

Na linha 1, como esquematizado no diagrama 1 da figura 5.9, procede-se a receção dos equipamentos de frio, tanto frigoríficos como arcas. Seguidamente são pré-descontaminados onde lhes são retirados vários componentes amovíveis, como prateleiras e gavetas, assim como diversos plásticos, vidros, cabos eléctricos e lâmpadas. Finalizada a pré-descontaminação, são armazenados no fim da linha até prosseguirem para a linha 2 (diagrama 2), onde são descontaminados.

#### **Linha 2 - Diagrama 2 (Descontaminação fase 1):**

Todo o processo se inicia com a perfuração do motor (compressor). É nesta primeira fase que são recolhidos em simultâneo os gases CFC, HCFC, HFC ou hidrocarbonetos (dependendo da data de fabricação do equipamento) e o óleo presentes no circuito de refrigeração.

Esta perfuração é realizada utilizando um equipamento altamente sofisticado provido de uma cabeça de perfuração que irá fixar-se à carcaça do motor por intermédio de uma ventosa capaz de evitar fugas. É então criado vácuo, feita a perfuração por meio de uma broca anti faísca e finalmente efetuada a aspiração da mistura óleo/fluido de refrigeração do circuito de refrigeração.

Quando a aspiração cessa e a mistura é totalmente recolhida, o vácuo desce abaixo de um valor fixado e a operação é automaticamente interrompida, a cabeça de perfuração afasta-se então da carcaça do motor.

A mistura óleo/fluido refrigerante é transferida para um reservatório, onde através de vácuo se procede à separação do fluido refrigerante do óleo encaminhando-o posteriormente, após compressão de 17 bar, para cilindros aptos ao seu melhor acondicionamento, sendo ainda o óleo (isento de gás) encaminhado para um contentor.

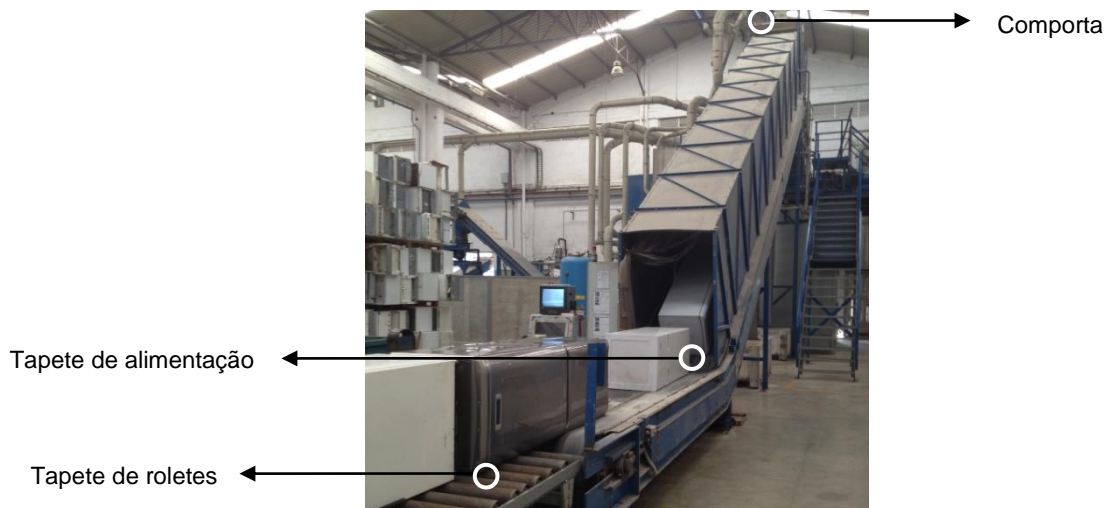
Para uma máxima segurança e evitando qualquer tipo de fuga e presença de CFC's na atmosfera envolvente, os sistemas interno (recolha e separação de fluidos) e externo (acondicionamento do gás recolhido) estão protegidos com sensores que detetam qualquer fuga de gás, e caso aconteça, emitem um alarme, fecham electroválvulas e interrompem imediatamente o seu funcionamento.

Após esta operação de despoluição, dá-se a separação do equipamento do motor (compressor) utilizando uma tesoura de corte e recolhido num contentor que o irá encaminhar para reciclagem.

A Recielectric encontra-se equipada com uma unidade de funcionamento totalmente automatizado fornecida pela ATN – Environmental Systems BV.

### **Linha 3 - Diagrama 3 (Fragmentação):**

Provenientes de descontaminação os frigoríficos e arcas são armazenados no tapete de roletes e introduzidos um a um manualmente no tapete de alimentação. Este tapete, como ilustrado na figura 5.10 encontra-se fechado e possui no topo uma comporta que fecha aquando da passagem do frigorífico ou arca para a câmara de trituração, onde se encontra o triturador. Assim que a comporta volta a abrir, outro frigorífico é aprisionado e triturado.



**Figura 5.10 – Representação da zona de alimentação da linha 3**

Na zona final do tapete de alimentação, junto à comporta, existem duas entradas de gás limpo provenientes do sistema de tratamento de gases, de forma a re-circular o gás livre de CFC's. É efetuada a medição do teor de R11/R12 no gás limpo re-circulado, que não deve exceder um valor limite admissível.

O material resultante da trituração segue para um moinho granulador onde o seu tamanho é reduzido a 20 mm. Após granulação, o material é descarregado para uma calha vibratória, e posteriormente

transportado num tapete transportador para uma segunda calha que alimenta a zona de separação, onde se procede à extração da espuma de isolamento e dos metais ferrosos contidos neste material. A espuma segue para a zona de peletização e o restante material submetido a um separador magnético (*overband*). A fração ferrosa é transportada para um contentor exterior, e recorre-se ainda a um tapete com tambor magnético para retirar algum metal ainda existente no material sobran­te.

A representação dos equipamentos envolvidos neste processo encontra-se na figura 5.11.



**Figura 5.11 – Zona de separação e Silo de espuma**

De seguida, o material vai para a separação alumínio/cobre (Al/Cu) numa corrente de *Foucault* onde se procede à separação do plástico da mistura Al/Cu. A fração plástica e a mistura Al/Cu são encaminhados para *big-bags* no exterior. Na figura 5.12 apresentam-se duas das saídas de material para o exterior, sem *big-bags* colocados.



**Figura 5.12 – Saídas de material (produtos finais)**

### **Linha 3 - Diagrama 4 (Peletização):**

A espuma transportada com o ar entra num Silo de armazenagem, já anteriormente representado na figura 5.11, que possui na parte superior um filtro de mangas. O ar atravessa o filtro enquanto que as poeiras caem para o Silo. Após esta filtração, o ar já livre de poeiras, segue de novo para a placa perfurada da zona de separação. A circulação de ar é feita através de um ventilador.

A espuma armazenada no Silo é por sua vez transportada para uma prensa Peletizadora (figura 5.13) por um transportador de parafuso situado na parte inferior do Silo.



**Figura 5.13 - Peletizadora**

O topo da prensa de peletização e o transportador de peletes (produto final da Peletizadora ilustrado na figura 5.14) à saída da prensa, possuem dois filtros de poeiras com malha de aço que filtram o ar e gás aspirado nos dois locais, estes gases seguem para um condensador.



**Figura 5.14 – Produto final da peletização (peletes)**

Os gases libertados durante a moagem de espuma, feita no interior da Peletizadora e na passagem para a matriz que forma as peletes são aspirados através de um ventilador. Estes gases são encaminhados para tratamento e o restante re-circulado para a Peletizadora. No caso de frigoríficos pentano, existe uma entrada na tubagem de recirculação de gás do processo para a Peletizadora, que injeta azoto para controlar a percentagem de oxigénio nos gases.

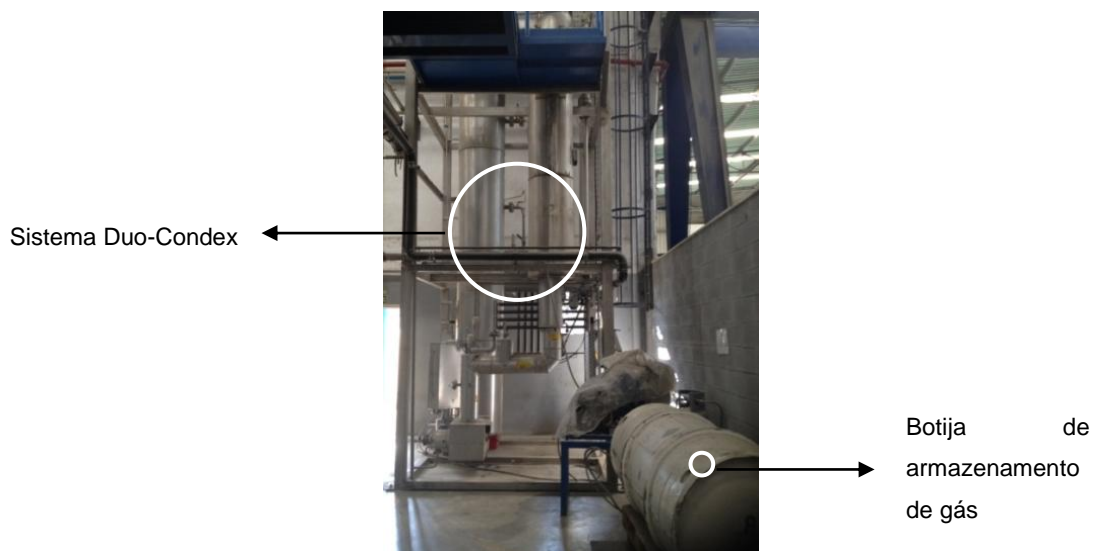
### **Linha 3 - Diagrama 5 (Tratamento de gases):**

Os gases do processo libertados pela trituração e pela peletização da espuma de isolamento (mistura ar/azoto e CFC ou HCFC ou Hidrocarbonetos) são aspirados do circuito, através de um ventilador sobre pressor de vácuo.

A mistura gasosa recolhida nesta aspiração é sujeita a fracionamento em condições criogénicas de forma a se puder realizar a condensação do CFC/HCFC. Estes são posteriormente encaminhados

para cilindros de armazenagem específicos e projetados segundo as normas europeias para o acondicionamento deste tipo de gases, sem qualquer tipo de intervenção humana.

A linha de fragmentação de equipamentos de frio da Recielectric está equipada com um aprimorado sistema de crio condensação do tipo Duo-Condex 300, representado na figura 5.15, com pré-condensação com azoto gasoso, fornecido pela Rotamill GmbH (parte de ventilação) / Messer GmbH (crio condensação) e integrado no sistema de fragmentação pela Adelman GmbH, fornecedor global da linha.



**Figura 5.15 – Sistemas de crio condensação do tipo Duo-Condex**

Os gases refrigerantes mais comuns presentes no circuito de refrigeração são o cloro-diflúor-metano (R22), o tetraflúor-etano (R134a) e o butano (R600). As suas características encontram-se listadas na tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Características dos gases mais comuns presentes no circuito de refrigeração**

Gases refrigerantes		Estado à temperatura ambiente	Temperatura de ebulição (°C)	Temperatura de fusão (°C)	ODP (Potencial de destruição da camada do ozono)	GWP (Potencial para aquecimento global)
<b>R22</b>	HCFC	Gás	-40,8	-175,4	0,055	1700
<b>R134a</b>	HFC	Gás	-26,5	-103,3	0	1300
<b>R600</b>	HC	Gás	-0,6	-138,4	0	3

Na espuma de isolamento (gases de insuflação da espuma), os gases mais frequentes são o tricloro-flúor-carbono (R11), o dicloro-diflúor-carbono (R12), e os gases pentanos. As suas características encontram-se listadas na tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Características dos gases mais comuns presentes na espuma de isolamento**

Gases refrigerantes		Estado à temperatura ambiente	Temperatura de ebulição (°C)	Temperatura de fusão (°C)	ODP (Potencial de destruição da camada do ozono)	GWP (Potencial para aquecimento global)
<b>R11</b>	CFC	Líquido/gás	23	-110,48	1	3800
<b>R12</b>	CFC	Gás	-29,8	-157,7	1	8100
<b>n-Pentano</b>	HC	Líquido	36,1	-129,8	0	11
<b>Ciclopentano</b>	HC	Líquido	49	-94	0	11

### **5.2.3. Atividades típicas de manutenção desenvolvidas na linha 3**

A Recieletric dispõe de um plano de manutenção, primando pela aplicação de um conjunto de ações de manutenção preventiva nos vários equipamentos que compõe a linha 3.

Sempre que o operador de linha, deteta alguma falha ou avaria num equipamento, este procede à sua imediata reparação desde que se trate de uma manutenção possível de ser reparada por este, caso contrário reporta à seção responsável pela manutenção da empresa que atua em conformidade com a situação apresentada e a soluciona, de forma a retomar a produção o mais rapidamente possível.

Quando a empresa não possui pessoal qualificado à manutenção requerida ou o equipamento específico para a aplicar, recorre a empresas externas.

São vários os equipamentos sujeitos a operações de manutenção diária nos seus componentes e subcomponentes. Estas são feitas ao início do dia de produção e ao fim deste pelo próprio operador da linha, e incluem ações como:

- Limpezas;
- Lubrificações;
- Verificações de desgaste/corrosão/danos;
- Verificações de nível de óleo;
- Verificações de nível;
- Verificação de fugas;
- Verificações de funcionamento;
- Verificações de temperatura;
- Descargas de condensados;
- Substituições;
- Apertos;
- Remoção de material acumulado.

Para além das ações diárias supracitadas, existem outras ações de manutenção preventiva presentes no plano de manutenção da empresa que devem ser asseguradas. Em Anexo 2 é apresentada uma descrição mais pormenorizada das ações de manutenção preventiva realizadas assim como a periodicidade a que são aplicadas.



## **CAPÍTULO 6 - CASO DE ESTUDO: SISTEMA REPARÁVEL LINHA 3**

---

No presente capítulo, proceder-se-á à análise global do sistema reparável linha 3.

Para que este possa cumprir a sua produção, é necessário que todos os subsistemas que o constituem estejam operacionais e a funcionar em plenas condições.

A partir da informação contida no histórico de dados reais recolhido, dos tempos de falhas ordenados cronologicamente, é possível fazer uma análise às causas passíveis de provocar interrupções no sistema, e que por consequência contribuem para o tempo não produtivo desta e determinar alguns indicadores de desempenho que permitirão tirar elações importantes sobre o desempenho da linha de produção 3. O diagrama de Pareto permitirá concluir quais os equipamentos mais determinantes na ocorrência de paragens, e nos quais se deve dar prioridade de atuação.

Dado que todos os equipamentos funcionam em série, uma interrupção ou falha de um destes subsistemas, terá como consequência a paragem total da linha e perda de produção, pelo que se avaliará individualmente os equipamentos mais críticos.

A partir da ordem cronológica das falhas, avaliar-se-á o comportamento do sistema assim como dos seus equipamentos críticos em termos da sua fiabilidade, taxa de avarias, manutibilidade e disponibilidade, e com base nestes indicadores aferir qual o comportamento de cada equipamento no que respeita às falhas. Recorrendo ao teste de Laplace é possível concluir se o sistema reparável se comporta segundo um PPH ou segundo um PPNH, e desta forma avaliar a existência de tendência na taxa de falhas, isto é, se existem indícios estatísticos de taxa de avarias constante, crescente ou decrescente.

### **6.1. Análise das interrupções verificadas na linha 3**

Considera-se que o sistema é interrompido, quando deixam de estar reunidas as condições necessárias para que a produção prossiga de forma contínua e dentro dos padrões considerados normais. A principal causa de interrupção da linha 3 está relacionada com falhas nos equipamentos que a compõe, e que exigem intervenções de manutenção corretiva. Contudo, não são as únicas causas de paragem verificadas. A análise às interrupções verificadas na linha 3 realizou-se durante o segundo semestre do ano de 2014.

O histórico representa um arquivo cronologicamente ordenado, contendo todas as situações verificadas ao longo do dia de trabalho, assim como a hora a que se iniciam e findam, e que alteram o estado de funcionamento da linha. O preenchimento dos campos de informação necessários para efetuar o histórico de dados reais da linha é feito pelo próprio operador diariamente.

Do registo de trabalho constam:

- Data da realização;
- Hora de início e fim das limpezas e afinações diárias (tanto as realizadas ao início de dia de trabalho como as realizadas ao fim);
- Tipos de intervenções efetuadas;
- Hora de início e fim de cada intervenção;
- Observações feitas pelo próprio operador.

Na tabela 6.1 encontram-se reunidas todas as intervenções efetuadas em equipamentos da linha e a respetiva duração em horas.

**Tabela 6.1 – Intervenções por equipamento e respetiva duração em horas**

<b>Subsistema</b>	<b>Número de ocorrências</b>	<b>Duração (h)</b>
<b>Silo cheio</b>	71	53,17
<b>Peletizadora</b>	40	76,58
<b>Granulador</b>	9	7,42
<b>Duocondex</b>	8	4,25
<b>Sensor CO</b>	4	2,17
<b>Triturador + Granulador</b>	3	2,25
<b>Triturador</b>	1	16,75
<b>Tapete saída de poliuretano</b>	1	1,00
<b>Sensor CO + Sensor pentano</b>	1	4,00
<b>Monitor de controlo</b>	1	2,00
<b>Sensor pentano</b>	1	0,33
<b>Sistema vídeo</b>	1	4,00
<b>Comporta de segurança</b>	1	76,50
<b>Compressor principal de ar</b>	1	1,00
<b>Tapete principal</b>	1	0,50

Não são somente os grandes problemas que impedem que a produção se realize. Na tabela 6.2 encontram-se representadas todas as paragens da linha 3, assim como a frequência em que ocorreram e respetiva duração em horas, não motivadas por falhas em equipamentos.

**Tabela 6.2 – Outras causas de paragem**

<b>Causa</b>	<b>Número de ocorrências</b>	<b>Duração (h)</b>
<b>Contentor de poliuretano</b>	19	5,33
<b>Formação interna</b>	1	1,00
<b>Teste arcas - preparação</b>	1	1,50
<b>Teste arcas - pesagens</b>	1	1,00
<b>Teste RAC</b>	2	4,00
<b>Falha no fornecimento de energia</b>	2	3,17
<b>Auditoria Externa</b>	1	1,00
<b>Teste weelabex – limpeza geral</b>	1	3,50
<b>Teste weelabex - preparação</b>	1	3,25
<b>Teste weelabex</b>	1	8,50

De entre as causas de paragem não motivadas por falhas nos equipamentos destacam-se as paragens para troca do Contentor de poliuretano pelo elevado número de ocorrências verificadas no período em estudo (19 ocorrências). Esta paragem deve-se ao fato de o Contentor de poliuretano encher a uma velocidade superior aos restantes contentores e necessitar de ser vazado a meio da produção. Esta troca faz-se com recurso a uma camiã que retira o contentor cheio de poliuretano e o troca por um vazio.

O teste de arcas, o teste RAC e o teste weelabex são testes obrigatórios e programados feitos na linha de produção. O teste weelabex é um teste feito com o intuito à obtenção de certificação por parte da Recieletric segundo o referencial weelabex, que significa excelência no tratamento de REEE a nível europeu.

### **6.1.1. Cálculo de tempos de paragem**

Para melhorar a linha 3, é fulcral conhecer a capacidade produtiva da linha e das variáveis que influenciam o rendimento desta. Proceder-se-á à análise do histórico recolhido, de Julho a Dezembro do ano de 2014, tendo por base os vários tempos de estado da linha, para posterior cálculo das medidas de desempenho consideradas mais relevantes para o sistema de produção em estudo.

O operador da linha 3 inicia o seu trabalho às 7:00h e cessa funções às 18:30h, sendo que os primeiros 30 minutos de cada dia assim como a última hora são destinados a limpezas e afinações diárias, não se encontrando por isto, neste período, a linha a produzir. Esta é a situação espectável não sendo contudo esta que se verifica diariamente devido a vários fatores, como avarias nos diversos equipamentos que compõe a linha, atrasos na produção, entre outros.

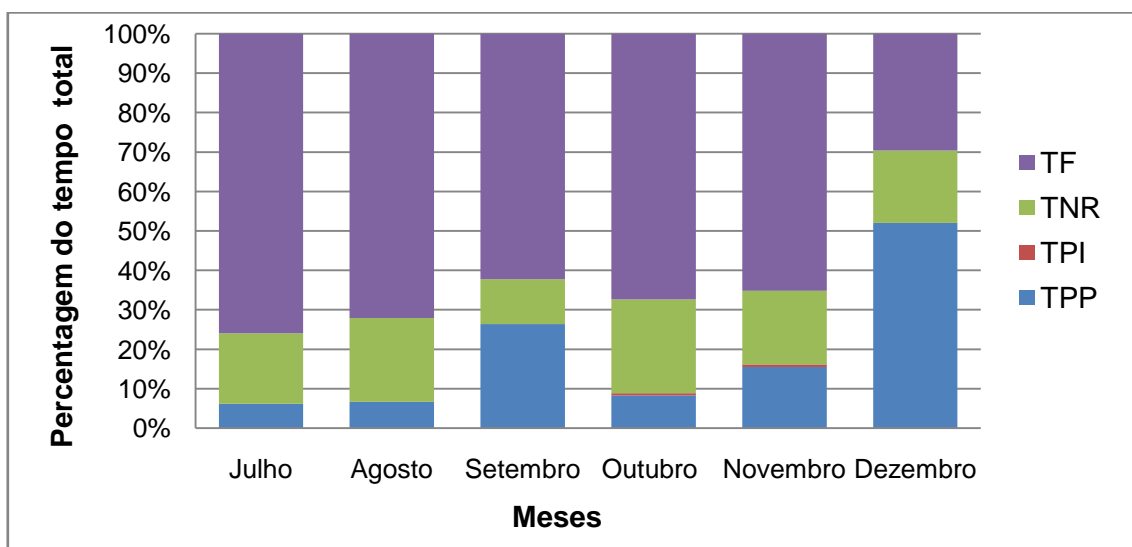
O tempo total de observação (TT), os tempos de paragens próprias (TPP), os tempos de paragens induzidas (TPI) e os tempos não requeridos (TNR) encontram-se representados na tabela 6.3 para os vários meses em análise. A partir destes valores foi possível calcular o tempo requerido (TR), ou seja,

o período dentro do tempo total em que a instalação se encontra requisitada para a produção e o tempo de funcionamento da linha (TF), correspondente ao tempo dentro do requerido, onde se trituram frigoríficos, ou seja, durante o qual efetivamente se produz.

**Tabela 6.3 – Tempos de estado referentes aos vários meses do período em análise**

Período	TT (h)	TPP (h)	TPI (h)	TNR (h)	TR (h)	TF (h)
<b>Julho</b>	304,88	18,92	0,00	54,30	250,58	231,67
<b>Agosto</b>	217,83	14,42	0,00	46,42	171,42	157,00
<b>Setembro</b>	294,25	77,67	0,00	33,42	260,83	183,17
<b>Outubro</b>	288,50	23,92	1,50	68,83	219,67	194,25
<b>Novembro</b>	268,25	41,58	1,67	50,25	218,00	174,75
<b>Dezembro</b>	173,50	90,33	0,00	31,75	141,75	51,42
<b>Total</b>	<b>1547,22</b>	<b>266,83</b>	<b>3,17</b>	<b>284,97</b>	<b>1262,25</b>	<b>992,25</b>

A linha 3 apresenta um tempo total de observação durante os 6 meses avaliados de 1547,22 horas, sendo aproximadamente 17,25% (266,83 horas) correspondentes a paragens próprias, 18,42% (284,97 horas) a tempo não requerido e somente 0,20% (3,17 horas) a paragens induzidas. O tempo de funcionamento representa 64,13% do tempo total de observação, ou seja, durante o tempo total de trabalho na linha apenas se produz em 64,13% desse tempo. A representação dos pesos de cada tempo de estado da linha em relação ao tempo total encontra-se ilustrada na figura 6.1.

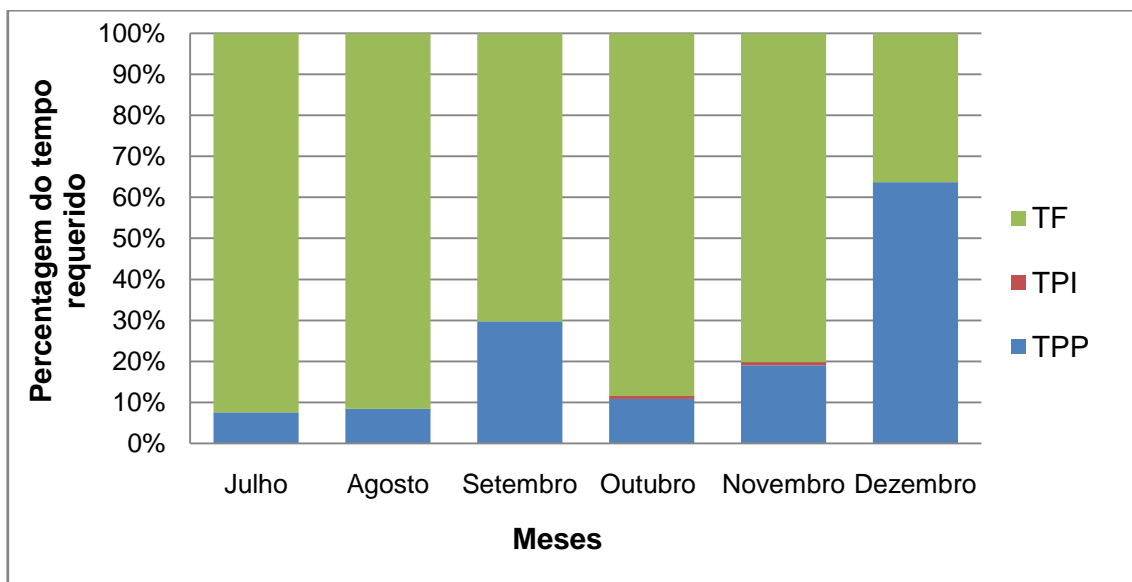


**Figura 6.1 – Pesos de cada tempo de estado da linha em relação ao tempo total**

Uma vez que dentro do tempo total se encontra o tempo não requerido, em que não se prevê produção, maioritariamente por manutenções de carácter preventivo, como as realizadas ao início e ao fim do dia de trabalho, é importante avaliar o peso do tempo de funcionamento relativamente ao tempo requerido, disponível para produzir. Dentro do tempo requerido são os tempos de paragens próprias que mais contribuem para a paragem da linha (21,14%) e consequente não produção, como seria de esperar devido ao elevado número de paragens por falhas em vários equipamentos. As

paragens induzidas representam somente 0,25% do tempo requerido. Conclui-se ainda que 78,61% do tempo requisitado para produção é usado para tal.

A representação dos pesos de cada tempo de estado em relação ao tempo requerido encontra-se ilustrada na figura 6.2.



**Figura 6.2 – Pesos de cada tempo de estado em relação ao tempo requerido**

O tempo de paragens próprias é o período de paragem cuja causa pertence ao meio de fabricação, sendo constituído por tempos de paragem por avarias (TPA) que exigem manutenções corretivas, e causadas por fatores como encravamentos, substituições, anomalias várias, limpezas ou reparações nos vários equipamentos que constituem a linha, e por tempos de paragens funcionais (TAF), como controlos de qualidade, afinações, regulações ou controlo a vários indicadores de nível.

O tempo de paragens induzidas (TPI) corresponde ao período de paragem não programado originado por causas ligadas a fatores externos. No período em estudo o tempo de paragens induzidas é constituído por tempos de paragem induzidos por falhas no fornecimento de energia.

O tempo não requerido (TNR), durante o qual, como já referido, não se prevê produção é constituído por tempos em manutenções programadas (preventivas), e tempos ocupados com testes de qualidade à linha, programados e feitos por empresas externas (teste RAC, teste arcas, teste weelabex), auditorias externas e formações internas (sistemas de gestão e qualidade do ambiente).

### **6.1.2. Cálculo de indicadores de desempenho**

Com base nos tempos calculados anteriormente e apresentados na tabela 6.3, e recorrendo às equações para cálculo da disponibilidade operacional (equação 3.1), disponibilidade própria (equação 3.2) e disponibilidade induzida (equação 3.3), foram calculadas as diversas disponibilidades da linha de produção:

$$DO = \frac{992,25}{1262,25} \times 100 = 78,61\% \quad (6.1)$$

$$Dp = \frac{992,25}{992,25 + 266,83} \times 100 = 78,81\% \quad (6.2)$$

É de conclusão óbvia, a forma de cálculo da indisponibilidade própria, uma vez que a disponibilidade e a indisponibilidade se complementam, esta última será calculada através da equação 6.3:

$$Ip = 1 - Dp = 0,2119 \quad (6.3)$$

Onde:

*Ip* - Indisponibilidade própria

$$Di = \frac{1262,25 - 3,17}{1262,25} \times 100 = 99,75\% \quad (6.4)$$

A indisponibilidade, tal como se procedeu anteriormente, é calculada de igual modo:

$$Ii = 1 - Di = 0,0025 \quad (6.5)$$

Onde:

*Ii* - Indisponibilidade induzida

Pode então concluir-se que a linha 3 esteve disponível para produzir durante 78,61% do tempo requisitado para tal (tempo requerido), e indisponível 21,19% do tempo devido a paragens próprias e 0,25% por paragens induzidas. Em suma, 21,39% do tempo em que se previa produção foi perdido. Estas conclusões já tinham sido verificadas no gráfico de pesos 6.2 representativo dos pesos que cada tipo de paragens teve no tempo requerido.

A tabela 6.4 apresenta o número de frigoríficos triturados mensalmente durante o período em estudo. O número de frigoríficos triturados define a quantidade de frações finais resultantes destes.

Também será dada a designação de peças aos equipamentos de frio.

**Tabela 6.4 – Número de frigoríficos triturados por mês**

<b>Mês</b>	<b>Número de frigoríficos triturados</b>
<b>Julho</b>	5380
<b>Agosto</b>	3765
<b>Setembro</b>	4940
<b>Outubro</b>	5765
<b>Novembro</b>	5465
<b>Dezembro</b>	1837
<b>Total</b>	<b>27152</b>

A partir do registo do número de frigoríficos triturados mensalmente durante o período em estudo é possível calcular o tempo de ciclo real, ou seja, o tempo necessário para triturar um frigorífico através da expressão seguinte (equação 6.6):

$$T_{cm} = \frac{TF}{NPR} = \frac{992,25}{27152} = 0,036 \text{ horas/peça} \quad (6.6)$$

O tempo de ciclo real da linha é de 0,036 horas/peça, significando por isto que em média, são necessários aproximadamente 2,15 minutos para triturar um frigorífico.

Em condições reais podemos ainda concluir a quantidade de peças que não foram produzidas devido a paragens próprias (as mais significativas para a não produtividade) que perfazem um total de 266,83h no tempo total de observação, tendo em conta este tempo de ciclo real de 0,036 horas/peça obtido:

$$\frac{266,83 \text{ h} \times 1 \text{ peça}}{0,036 \text{ h}} = 7412 \text{ peças} \quad (6.7)$$

É então possível aferir que neste tempo em que a linha parou poderiam ter sido produzidas 7412 peças.

O tempo de ciclo teórico é normalmente determinado pelo fabricante do equipamento e corresponde ao tempo necessário para fabricar uma peça à velocidade nominal, ou seja o tempo que o meio de produção é capaz de realizar, sempre que bem aprovisionado e respeitando todas as normas de funcionamento (Norma Renault E41.50.505.R, 2001). Para o sistema em causa interessa saber qual o tempo necessário à trituração de um frigorífico, o fabricante determina que este valor é de 0,017 horas/peça ou seja teoricamente seria de esperar que 1 minuto fosse o tempo necessário para a fabricação de uma peça, neste caso trituração de um frigorífico.

Se a máquina funcionar em modo automático respeita este tempo teórico, ou seja a comporta abre de minuto a minuto, exatamente, para entrar outro frigorífico, mas acaba por encravar pois dar-se-á a entrada de um frigorífico na zona de trituração enquanto outro ainda esta a concluí-la, isto acontece por não existir um sensor que abra a comporta somente quando a trituração está completamente concluída, e ao fato de os frigoríficos necessitarem de tempos diferentes para serem completamente triturados. Esta impossibilidade leva à acentuada diferença existente entre o tempo de ciclo teórico e o tempo de ciclo real, pois é o operador que aciona a entrada de um novo frigorífico.

A relação entre estes dois indicadores permite a determinação do rendimento velocidade (equação 6.8):

$$Rv = \frac{T_{cth}}{T_{cm}} = \frac{0,017}{0,036} = 0,465 \quad (6.8)$$

Outro indicador importante é o da produtividade operacional, que exprime o comportamento produtivo da linha, e pode ser determinada a partir da equação 6.9:

$$Po = \frac{NPR}{TR} = \frac{27152}{1262,25} = 21,51 \text{ peças/hora} \quad (6.9)$$

A linha 3 tem uma capacidade produtiva de aproximadamente 22 frigoríficos por hora.

### 6.1.3. Cálculo do rendimento operacional por tempos

O cálculo do rendimento operacional pode ser obtido através da multiplicação dos fatores disponibilidade, rendimento velocidade e qualidade, através da equação 6.10:

A variável taxa de qualidade definida pela relação entre o número de peças boas fabricadas e o número de peças realizadas não se aplica à situação analisada visto que todos os frigoríficos são triturados dando origem a um produto final que é constituído por um conjunto de várias frações destes não se considerando portanto que existam peças más fabricadas. Considerar-se-á portanto, que esta variável tem valor unitário tendo em conta que se trata de uma multiplicação, não tendo assim esta variável peso no resultado final do rendimento operacional.

$$RO = Do \times Rv \times Tq = 0,786 \times 0,465 \times 1 = 0,366 \quad (6.10)$$

Conclui-se que o valor do rendimento operacional é de 0,366.

A partir do número de peças teoricamente realizáveis é possível calcular as perdas de rendimento operacional devidas às paragens verificadas, tanto próprias como induzidas durante o tempo requerido. Este indicador corresponde ao número de peças teoricamente realizáveis no tempo requerido.

$$NPTR = \frac{TR}{Tcth} = \frac{1262,25}{0,017} = 74250 \text{ frigorificos} \quad (6.11)$$

As perdas de rendimento operacional em número de peças podem ser determinadas a partir das equações 6.12 e 6.13.

$$Ppp = \frac{\text{número de peças perdidas devido a paragens próprias}}{NPTR} = \frac{\left(\frac{266,83}{0,017}\right)}{74250} \times 100 = 21,14\% \quad (6.12)$$

$$Ppi = \frac{\text{número de peças perdidas devido a paragens induzidas}}{NPTR} = \frac{\left(\frac{3,17}{0,017}\right)}{74250} \times 100 = 0,25\% \quad (6.13)$$

É possível aferir que 21,14% das peças perdidas são devidas a paragens do tipo próprias e 0,25% devido a paragens induzidas. A quantidade de peças que se perdem por falhas nos equipamentos é considerável.

## **6.2. Análise de fiabilidade do sistema reparável**

A fiabilidade de um bem define-se como a aptidão que um bem tem de cumprir uma função que lhe é solicitada em determinadas condições, durante um certo período de tempo (Norma NP EN 13306, 2007).

Sendo as paragens próprias, as paragens que levam a maiores perdas produtivas, é fundamental a análise das causas mais frequentes de falhas nos equipamentos que compõe a linha 3, assim como as intervenções que levam a maiores tempos de não produtividade, pelo maior tempo de reparação exigido pelo equipamento em causa aquando de uma reparação.

Com base no registo histórico de falhas relativo ao período compreendido entre 1 de Julho de 2014 a 31 de Dezembro de 2014 (2º semestre de 2014), na linha 3 da empresa, procedeu-se à análise de comportamento tanto do sistema linha 3, como dos seus subsistemas, em termos de fiabilidade.

Desta forma, procedeu-se à análise da tendência dos dados sob o ponto de vista do processo estocástico e para um determinado nível de significância, recorreu-se ao teste de Laplace para concluir se o sistema reparável em análise se comporta segundo um PPH ou segundo um PPNH, verificando assim se a taxa de falhas é constante ou apresenta alguma tendência.

### **6.2.1. Identificação das causas passíveis de provocar problemas no sistema**

Na tabela 6.5 encontram-se representadas as causas de paragem do sistema linha 3 assim como o número de ocorrências e o subsistema onde a falha ocorreu, no período de ensaio considerado, ou seja, durante o 2º semestre do ano de 2014. Estas paragens foram consequência de uma falha imprevista que parou a produção por completo, e foram solucionadas com o intuito de retomar a produção com a maior brevidade possível, nas melhores condições.

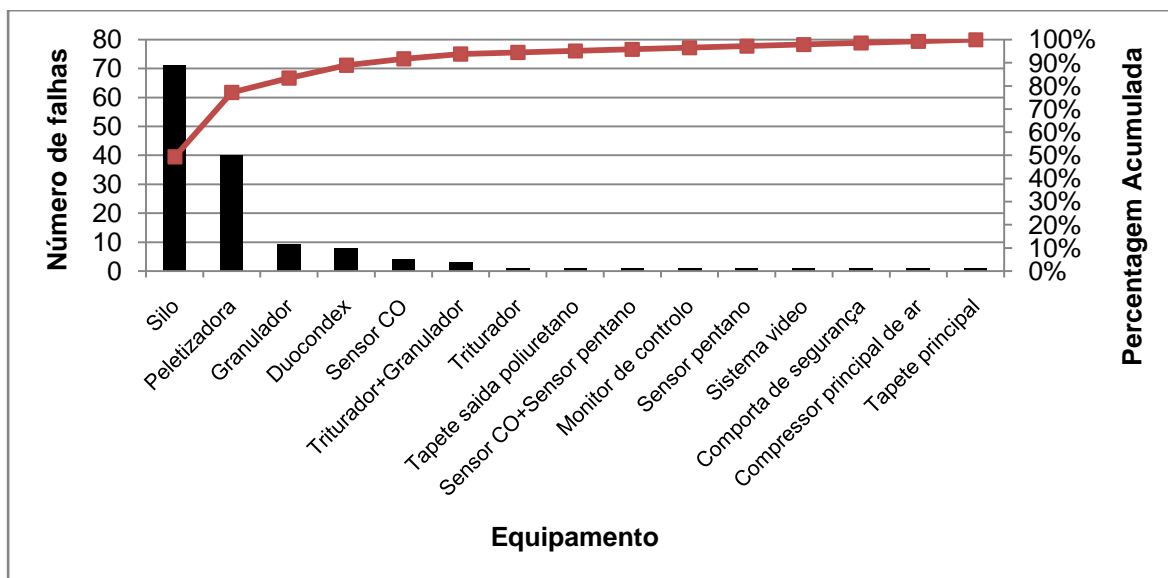
Tabela 6.5 – Causas de paragens no sistema linha 3

Equipamento	Causa	Número de falhas	Tempo de reparação
Peletizadora	Encravamento	38	31:35
Peletizadora	Substituição matriz	1	44:30
Peletizadora	Afinação rolos	1	0:30
Silo	Cheio	71	53:10
Duocondex	Limpeza filtro cónico do Sobrepessor	4	2:00
Duocondex	Anomalia válvula SV5	1	1:00
Duocondex	Rutura nível LIS	1	0:30
Duocondex	Anomalia regeneração de ar	2	0:45
Sensor CO	Anomalia	3	1:25
Sensor CO	Calibração valores oxigénio (empresa externa)	1	0:45
Tapete de saída de poliuretano	Anomalia no suporte	1	1:00
Granulador	Encravamento	4	1:50
Granulador	Substituição de parafuso partido no estator	2	4:30
Granulador	Encravamento material tremonha de alimentação	2	0:35
Granulador	Anomalia sensor segurança da tremonha de alimentação	1	0:30
Sensores do gás pentano + sensor CO	Substituição	1	4:00
Monitor de controlo	Substituição	1	2:00
Sensor gás pentano	Calibração	1	0:20
Sistema vídeo	Reparação	1	4:00
Triturador	Empurrador com avaria	1	16:45
Comporta de segurança	Alteração/Reparação	1	76:30
Compressor principal de ar	Anomalia	1	1:00
Tapete principal	Anomalia	1	0:30
Triturador + Granulador	Encravamento	3	2:15

Recorreu-se ao diagrama de Pareto (figura 6.3) como instrumento de análise estatística para o estudo da fiabilidade do sistema em análise.

Esta ferramenta de qualidade, pretende através de um gráfico de frequências, ilustrar a contribuição relativa de cada causa passível de provocar o problema em análise, possibilitando visualizar quais as causas mais determinantes na ocorrência de um determinado problema, e permitindo desta forma estabelecer prioridades de atuação evitando o desperdício de esforços no combate a causas que não tem grande efeito na manifestação do problema (Pereira & Requeijo, 2012).

O princípio de Pareto postula que cerca de 20% das causas passíveis de provocar problemas no processo produtivo originam cerca de 80% destes (Classe A – classe de grande relevância), 30% das causas seguintes produzem 15% dos efeitos (Classe B – classe de média relevância) e os 50% restantes são responsáveis por apenas 5% (Classe C – classe de pequena relevância) (Pereira & Requeijo, 2012).

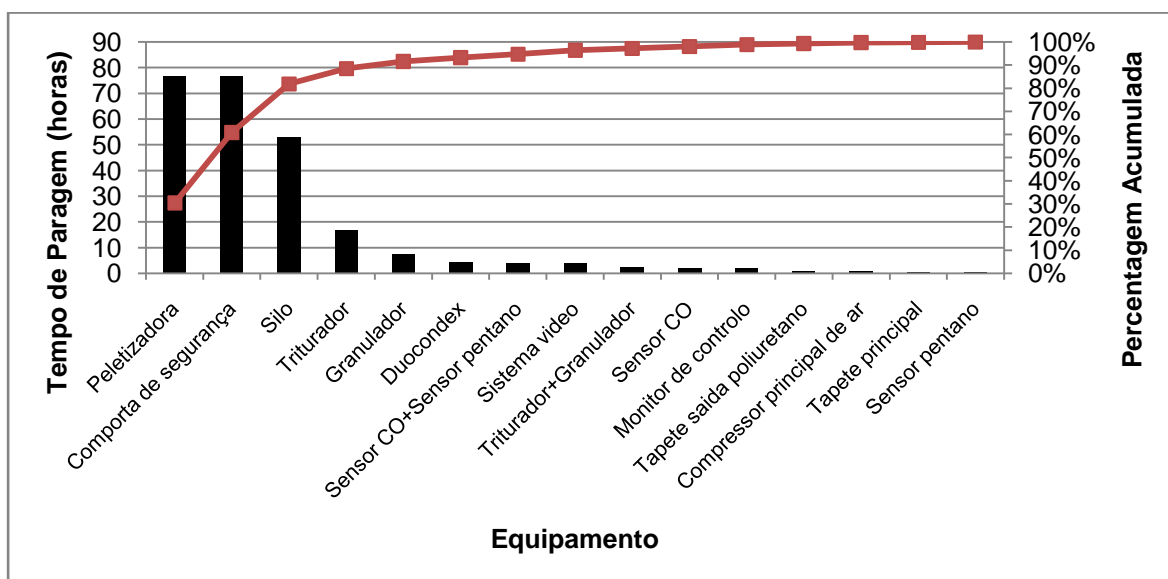


**Figura 6.3 – Diagrama de Pareto do número de falhas por equipamento**

Pela visualização do diagrama de Pareto representado na figura 6.3, conclui-se que os equipamentos que mais contribuem para a ocorrência de uma paragem são as paragens do Silo com 71 falhas correspondentes a 49% das falhas totais, e da Peletizadora (28%) responsáveis por cerca de 80% do número total de falhas verificadas durante o período considerado, sendo então os equipamentos classificados como classe A e neste tipo de análise os equipamentos a que se deve dar maior relevância, e possível foco de atuação.

Sendo um diagrama de frequências, é importante referir que na figura 6.3 apenas se indicam os equipamentos com maior frequência de falhas, não significando por isto, que sejam estes os que têm efeitos mais graves a nível de tempo de paragem e consequente não produtividade.

Para identificar os equipamentos que mais contribuem para a não produtividade da linha 3, pelo tempo de paragem que originam recorreu-se ao diagrama de Pareto apresentado na figura 6.4.



**Figura 6.4 – Diagrama de Pareto do tempo de paragem por equipamento em falha**

Conclui-se que 80% do tempo de paragem relativamente a avarias se deve a falhas nos equipamentos Peletizadora (30%), Comporta de segurança (30%) e Silo (21%). É de notar que a Comporta de segurança conta apenas com 1 falha em todo o período de ensaio mas origina um tempo de não produtividade, por paragem para manutenção corretiva muito grande. O mesmo acontece com o Triturador.

Na tabela 6.6 representam-se os equipamentos que mais significativamente contribuem para as falhas registadas durante o período de ensaio. São estes o Silo e a Peletizadora com 71 e 40 falhas respetivamente, responsáveis, como já anteriormente referido, por cerca de 80% do número total de falhas verificadas durante o período considerado. A Peletizadora e o Silo são ainda, como é possível verificar através do diagrama de Pareto da figura 6.4, os equipamentos que mais contribuem para um maior tempo de não produtividade, por paragens para manutenção corretiva.

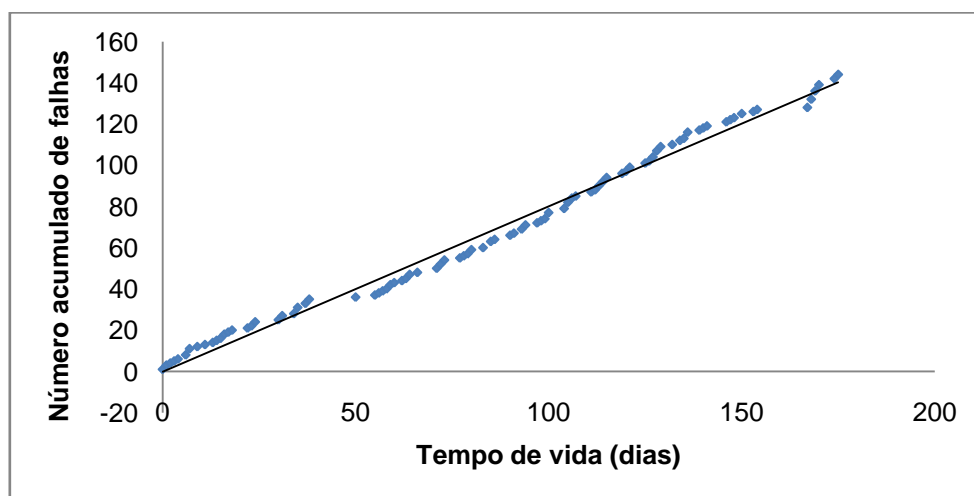
**Tabela 6.6 – Contribuição relativamente a falhas dos equipamentos considerados críticos**

<b>Equipamento crítico</b>	<b>Percentagem relativamente ao número total de falhas</b>
<b>Silo</b>	49,31%
<b>Peletizadora</b>	27,78%
<b>Granulador</b>	6,25%
<b>Duocondex</b>	5,56%

Os equipamentos Granulador e Duocondex pertencentes à classe de média relevância serão também foco de análise.

### 6.2.2. Análise de tendência do sistema reparável

O gráfico da figura 6.5 permite visualizar o comportamento do sistema linha 3, através da representação do número acumulado de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento de ocorrência da falha.



**Figura 6.5 – Número acumulado de falhas em função do tempo de vida do sistema no momento de ocorrência da falha**

Observa-se grosseiramente que a taxa de falhas do sistema em análise durante o tempo de ensaio (2º semestre de 2014) segue uma tendência linear, pelo que se conclui que a taxa de falhas será constante.

De forma a verificar se a taxa de falhas do sistema linha 3 é ou não constante, recorreu-se ao teste de Laplace, definido pelas seguintes hipóteses:

$H_0$ : Taxa de falhas constante (PPH)

$H_1$ : Taxa de falhas crescente ou decrescente (PPNH)

Sendo um teste limitado pelo tempo, recorreu-se à equação 4.20, para obtenção do valor  $Z_0$ .

Considerando um nível de significância de 10%, e tendo em conta que estamos perante um teste bilateral, tem-se:

$$|Z_{critico}| = \left| Z_{\frac{\alpha}{2}} \right| = |Z_{0,05}| = 1,64 \quad (6.14)$$

Como se pode verificar na tabela 6.7, para o nível de significância de 10%, o valor de  $Z_0$  é de -0,87.

**Tabela 6.7 – Parâmetros necessários à aplicação do teste de Laplace efetuado ao sistema linha 3**

$n_f$	$T$ (horas)	$\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i$ (horas)	$Z_0$	$Z_{critico}$
144	4215,75	316219,42	0,87	1,64

Como já referido os valores da estatística teste  $Z_0$  deverão situar-se dentro do intervalo de confiança ( $[-Z_{\alpha/2}; Z_{\alpha/2}]$ ), no pressuposto de um Processo Poisson Homogéneo, e tal acontece. Pode então concluir-se que o valor  $Z_0$  obtido não rejeita a hipótese nula pelo que a taxa de falhas se considera constante, como se fazia prever.

### Cálculo do MTBF do sistema linha 3:

Sendo a taxa de falhas do sistema constante, é possível calcular uma estimativa do MTBF (tabela 6.8), através da equação 3.13.

**Tabela 6.8 – Resultados do cálculo do MTBF do sistema linha 3**

$n_f$	$T$ (horas)	MTBF (horas)
144	4215,75	29,28

Como representado na tabela 6.8, o MTBF é de 29,28 horas.

O tempo médio mínimo entre falhas ou MTBF mínimo ( $\theta_i$ ), foi determinado a partir da expressão 3.14. Na tabela 6.9 estão representadas as variáveis necessárias ao cálculo do MTBF mínimo assim como o resultado deste.

**Tabela 6.9 – Resultados do cálculo do tempo mínimo entre falhas ou MTBF mínimo**

$n_f$	$\chi^2_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}$	$\theta_i$
144	321,26	<b>26,24</b>

Para um nível de significância de 10% o seu valor é de 26,24 horas.

### 6.2.3. Análise individual a cada equipamento

A análise da taxa de falhas relativa a cada equipamento permite retirar importantes elações sobre o comportamento de cada subsistema constituinte da linha 3.

Já identificados os subsistemas críticos tanto ao nível do número de falhas como ao nível do tempo de reparação que exigem, é importante, tal como efetuado para a linha 3, analisar as falhas de cada equipamento através da aplicação do teste de Laplace, e concluir quais são os mais críticos em termos de fiabilidade.

Para aplicação do teste de Laplace procedeu-se de igual modo ao efetuado para o sistema linha 3. Com recurso à equação 4.20 obtiveram-se os valores da estatística teste  $Z_0$  para cada equipamento, para um nível de significância de 10%. Os valores resultantes dos testes à tendência dos subsistemas reparáveis apresentam-se na tabela 6.10.

**Tabela 6.10 – Quadro síntese do teste de Laplace para os vários equipamentos críticos**

Equipamento	$n_f$	$T$ (horas)	$\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i$ (horas)	$Z_0$	Taxa de falhas
<b>Silo</b>	71	4215,75	210357,25	5,92	<b>Crescente</b>
<b>Peletizadora</b>	40	4215,75	39502,25	-5,82	<b>Decrescente</b>
<b>Duocondex</b>	8	4215,75	11297,75	-1,62	<b>Constante</b>
<b>Granulador</b>	12	4215,75	26896,42	0,38	<b>Constante</b>

Analisando os resultados obtidos pela aplicação do teste de Laplace é possível concluir quais os equipamentos que apresentam uma taxa de falhas crescente, decrescente ou constante.

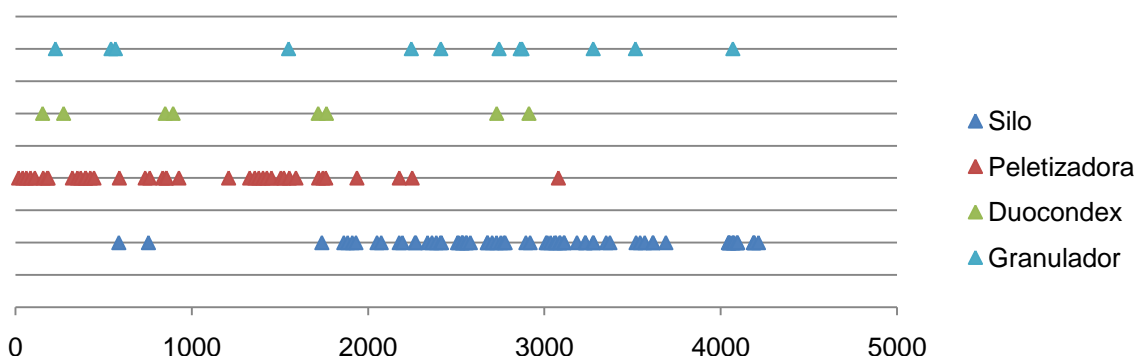
Os valores da estatística teste  $Z_0$  dos equipamentos Duocondex, e Granulador situam-se dentro do intervalo de confiança ( $[-Z_{\alpha/2}; Z_{\alpha/2}]$ ), indicando a presença de um PPH, pelo que não se rejeita a hipótese nula e a taxa de falhas se considera constante.

O equipamento Silo apresenta um valor de teste  $Z_0 = 5,92$ , valor positivo, fora do intervalo de confiança e bastante superior a  $Z_{\alpha/2} = Z_{0,05} = 1,64$ , indicando a presença de um PPNH com taxa de

falhas crescente. Pode afirmar-se que este equipamento é então o que apresenta uma função de risco mais elevada.

O equipamento Peletizadora pelo contrário apresenta um valor de teste  $Z_0 = -5,82$ , valor negativo, fora do intervalo de confiança e bastante inferior a  $-Z_{0,05} = -1,64$ . Evidenciando-se a presença de um PPNH com taxa de falhas decrescente.

Através do diagrama da figura 6.6 é possível analisar a distribuição temporal das falhas nos vários equipamentos críticos em foco.



**Figura 6.6 – Representação gráfica da ocorrência de falhas nos equipamentos críticos**

Como é possível aferir pela análise ao diagrama da figura 6.6, os equipamentos Duocondex e Granulador têm de fato um comportamento relativamente à ocorrência de falhas constante, no equipamento Silo é de notar a maior acumulação de falhas à medida que se aproxima o fim do período de ensaio, ao contrário do Peletizadora que manifesta esta acumulação inicial dispersando-se ao longo do período de ensaio. A análise a este diagrama sustenta as conclusões tiradas com o teste de Laplace.

Para os equipamentos com taxa de falhas constante a estimativa do MTBF calcula-se de igual modo ao adotado para o cálculo do MTBF para o sistema linha 3. Na tabela 6.11 apresentam-se os valores do MTBF para cada equipamento assim como o seu tempo médio mínimo entre falhas ou MTBF mínimo ( $\theta_i$ ).

**Tabela 6.11 – MTBF e MTBF mínimo calculados para os equipamentos Duocondex e Granulador**

Equipamento	$n_f$	$T$ (horas)	MTBF	$\chi^2_{\alpha, 2 \times (n_f + 1)}$	$\theta_i$
Duocondex	8	4215,75	526,97	25,99	324,42
Granulador	12	4215,75	351,31	35,56	237,08

Através da análise aos resultados apresentados na tabela 6.11, conclui-se que o equipamento Duocondex apresenta um MTBF de 526,97 horas e um MTBF mínimo de 324,42 horas, ou seja, uma taxa de falhas máxima de 324,42 horas. O equipamento Granulador apresenta um MTBF de 351,31

horas e um MTBF mínimo de 237,08 horas, valor bastante inferior ao do Duocondex por ter um número de falhas superior, seria óbvia esta conclusão.

#### 6.2.4. Sistema reparável com fiabilidade crescente

Através da aplicação do teste de Laplace concluiu-se que o equipamento Peletizadora se comporta segundo um PPNH, ou seja caracteriza-se por uma taxa de falhas dependente do tempo, apresentando tendência nos seus dados. Como os intervalos entre intervenções se manifestaram sistematicamente maiores, sabemos que estamos perante um PPNH com taxa de falhas decrescente.

Tratando-se de equipamentos cujo teste de Laplace denuncia tendência nas suas taxas de falhas, ou seja, equipamentos que se comportam como um PPNH, não é possível o cálculo do MTBF pois os tempos entre falhas não são constantes, recorre-se então ao denominado tempo cumulativo médio entre falhas (CMTBF). A estimação deste CMTBF é feita através da expressão 4.29 do modelo de Crow, indicado neste tipo de situações em que a taxa de falhas apresenta tendência.

A partir das equações 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18, procedeu-se ao cálculo das variáveis  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\lambda}$ ,  $\rho$  e CMTBF respetivamente:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln\left(\frac{T}{\tau_i}\right)} = 0,52005 \quad (6.15)$$

Como  $\beta < 1$  confirma-se que o PPNH tem uma taxa de falhas decrescente, ou seja existe uma tendência para o aumento dos intervalos de tempo entre falhas.

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^{\hat{\beta}}} = 0,52115 \quad (6.16)$$

$$\rho(4216) = 0,52115 \times 0,52005 \times 4216^{0,52005-1} = 0,00493 \quad (6.17)$$

$$CMTBF = \frac{1}{\rho(\tau)} = 202,66 \text{ horas} \quad (6.18)$$

A análise feita a este equipamento permitiu reunir os indicadores fiabilísticos apresentados na tabela 6.12, estimados pelo modelo de Crow.

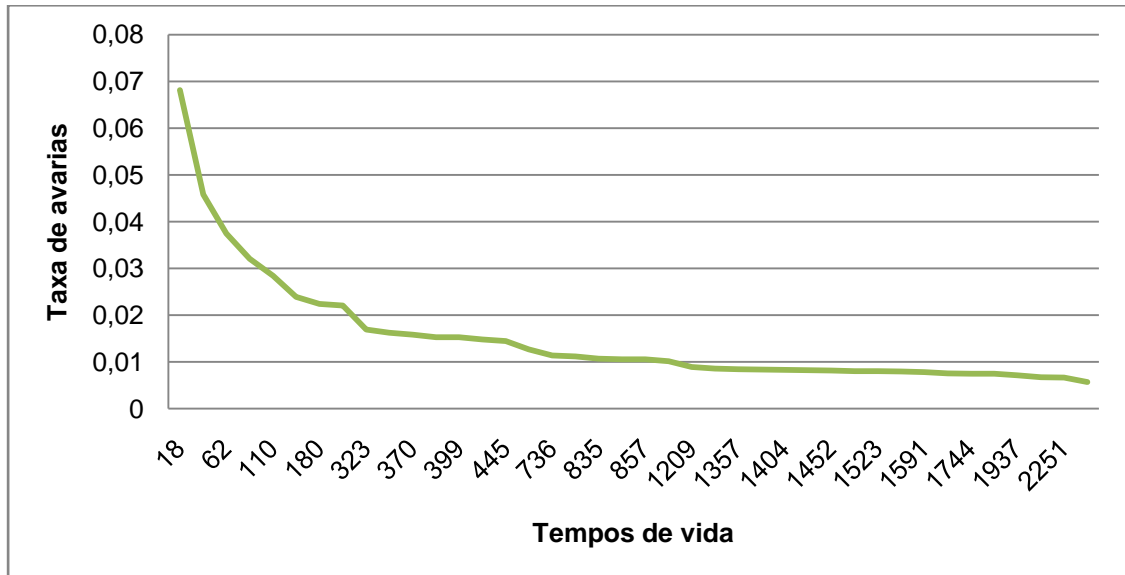
**Tabela 6.12 – Estimativa do valor CMTBF e seus limites para a Peletizadora**

Equipamento	CMTBF (horas)	Limite Inferior	Limite Superior
	$\hat{\theta}$	$\hat{\theta}_i(\tau)$	$\hat{\theta}_s(\tau)$
Peletizadora	202,66	139,83	307,03

Este equipamento apresenta um CMTBF de 202,66 horas, ou seja, pode concluir-se que em média e aproximadamente de 8 em 8 dias existe uma falha neste equipamento. Este valor é bastante inferior aos valores de MTBF apresentados para os equipamentos Duocondex e Granulador como já seria de esperar visto a Peletizadora falhar com uma frequência muito maior.

Os valores das constantes  $\pi_1$  e  $\pi_2$  necessárias ao cálculo dos limites inferior ( $\hat{\theta}_i(\tau)$ ) e superior ( $\hat{\theta}_s(\tau)$ ) obtêm-se diretamente da tabela em Anexo 1.

Com a taxa de avarias determinada é possível obter o gráfico da figura 6.7, representativo da evolução da taxa de falhas do equipamento reparável Peletizadora até à última falha durante o horizonte temporal estudado.



**Figura 6.7 – Taxa de avarias da Peletizadora em função do tempo de vida**

É notória a tendência decrescente da taxa de falhas da Peletizadora, já verificada pelo teste de Laplace.

O decréscimo de falhas notado na Peletizadora pode ter sido motivado pela substituição da matriz que a constituía. Esta substituição teve como objetivo resolver os sucessivos encravamentos na Peletizadora ou pelo menos diminuí-los. Houve substituição da matriz de diâmetro de furação de 6mm/60mm para uma de 8mm/60mm. A de 8 mm não permitiu contudo capturar de forma conveniente os gases e teve de ser substituída novamente por uma 5mm/50mm por não permitir uma recuperação adequada dos gases da espuma devido a uma menor taxa de compressão, a espuma não era suficientemente comprimida para libertar todo o gás, resultando num problema de qualidade e performance ambiental do processo. A legislação obriga a que a quantidade de gás que permanece na espuma final (peletes) seja inferior a 0,2%, e tal não aconteceu com a primeira substituição. Esta substituição de matriz pode ter solucionado parte dos problemas que levavam ao encravamento da Peletizadora.

Com recurso ao *software Statistica* v.12 foi possível estimar os parâmetros da distribuição de Weibull que melhor se ajustam aos dados do tempo de vida do equipamento Peletizadora.

Como já referido a função Weibull é caracterizada por ter uma grande versatilidade na descrição do tempo de vida até falha de componentes sujeitos a fenómenos de degradação, sendo por isso frequentemente utilizada como distribuição de probabilidade de falhas, modelando os tempos de vida dos componentes.

Para tal, foram inseridos os tempos de vida assim como as indicações de dados censurados, relativos ao equipamento em estudo, na folha de cálculo do *software*. Depois de inseridos os dados, recorreu-se ao comando *Statistics - Process Analysis- Weibull analysis & reliability/failure time analysis* para estimação dos valores dos parâmetros forma ( $\beta$ ) e escala ( $\eta$ ), assim como os respetivos limites inferior de controlo, ou *Low Control Limit* (LCL) e limite superior de controlo, ou *Up Control Limit* (UCL).

Através da tabela 6.13 revelada pelo comando *Summary Parameters* do *software*, é possível verificar que os parâmetros forma e escala do equipamento Peletizadora, assumem os valores, 0,72 e 93,16, respetivamente.

**Tabela 6.13 – Summary Parameters: parâmetros forma e escala da Peletizadora**

ML Estimates for 2-Parameter Weibull Distribution					
Peletizadora; Censoring: Censura (1,0) N=41 Censored:5					
Param.	Param. Value	Asympt. Std.Err.	-95,0% LCL	+95,0% UCL	Covariance Shap/Scl
Location	0,00000				
Shape	0,72785	0,08320	0,58176	0,9106	
Scale	93,16365	22,15084	58,46050	148,4672	0,496172

As funções densidade de probabilidade ( $f(t, \eta, \beta)$ ), a função de distribuição de probabilidade ( $F(t, \eta, \beta)$ ) e a função de fiabilidade ( $R(t, \eta, \beta)$ ), do equipamento Peletizadora para os valores dos parâmetros forma e escala determinados pelo programa, são dadas respetivamente pelas seguintes equações.

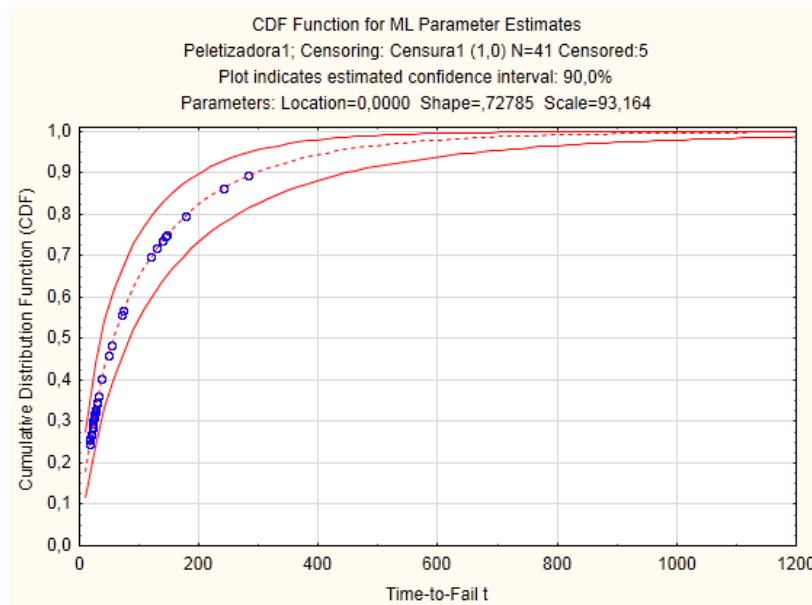
A função densidade de probabilidade é obtida através a equação 6.19:

$$f(t; 93,16; 0,73) = \frac{0,73}{93,16} \times \left[ \frac{t}{93,16} \right]^{0,73-1} \times e^{\left[ -\left( \frac{t}{93,16} \right)^{0,73} \right]} \quad (6.19)$$

A função acumulada de probabilidade  $F(t)$ , é obtida através da equação 6.20:

$$F(t; 93,16; 0,73) = 1 - e^{\left[ -\left( \frac{t}{93,16} \right)^{0,73} \right]} \quad (6.20)$$

O gráfico da figura 6.8 obtido pelo *software Statistica v.12* representa a função acumulada de probabilidade do equipamento Peletizadora:

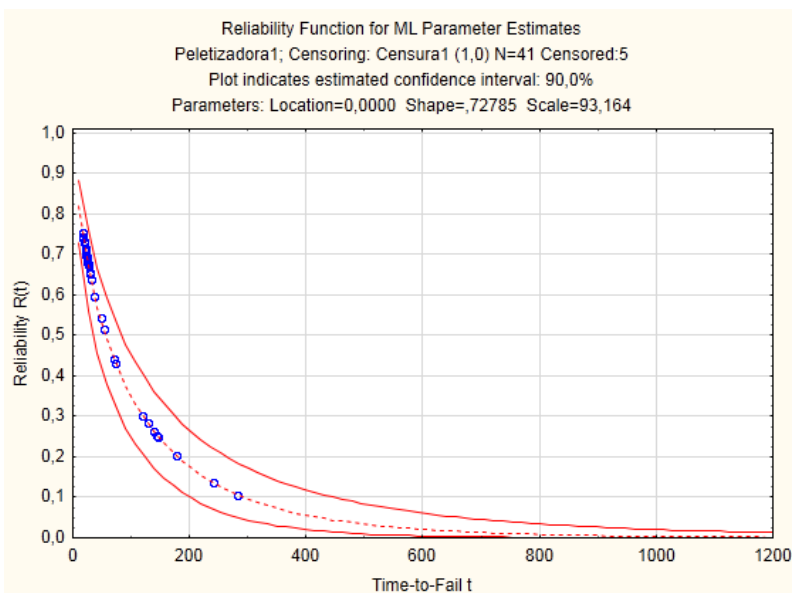


**Figura 6.8 – Função acumulada de probabilidade da Peletizadora**

E a função fiabilidade, obtida através da equação 6.21:

$$R(t; 93,16; 0,73) = 1 - F(t; 93,16; 0,73) = e^{\left[-\left(\frac{t}{93,16}\right)^{0,73}\right]} \quad (6.21)$$

O gráfico da figura 6.9 é representativo da fiabilidade do equipamento Peletizadora.



**Figura 6.9 – Fiabilidade do equipamento Peletizadora**

### 6.2.5. Sistemas reparáveis com taxas de falhas constantes

O teste de Laplace aplicado aos equipamentos Duocondex e Granulador permitiu concluir, para o nível de significância considerado (10%), que estes sistemas reparáveis se comportam segundo um PPH, apresentando uma sequência infinita de tempos entre avarias, independentes e distribuídos de forma exponencialmente idêntica, caracterizados por possuir uma taxa de falhas ( $\lambda$ ) que se apresenta constante.

As análises feitas a cada um destes equipamentos permitiu reunir os indicadores fiabilísticos apresentados na tabela 6.14.

**Tabela 6.14 –Indicadores fiabilísticos calculados para os equipamentos Duocondex e Granulador**

Equipamento	$n_f$	T	MTBF	$\theta_i$
Duocondex	8	4216	526,97	324,42
Granulador	12	4216	351,31	237,08

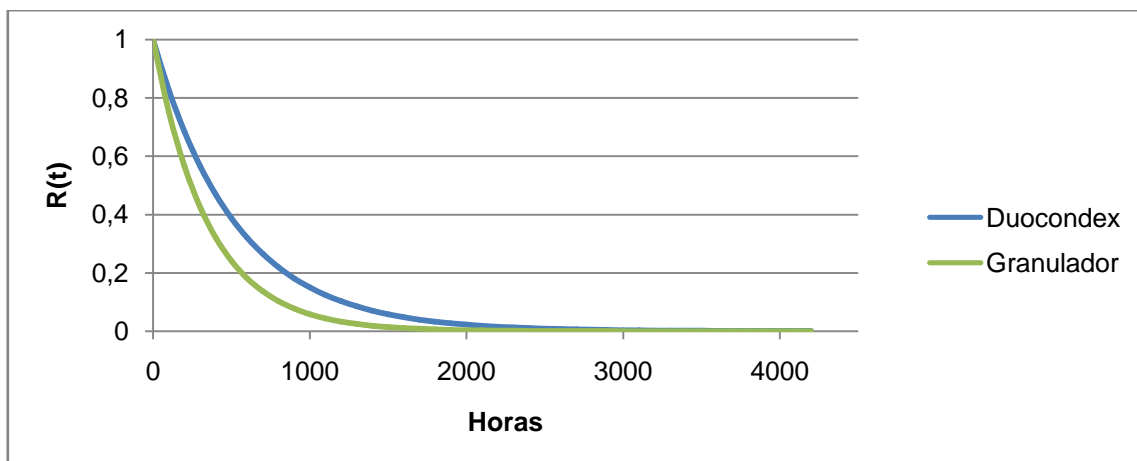
Os valores da taxa de falhas ( $\lambda$ ) calculados a partir do inverso do valor dos MTBF, para cada equipamento, encontram-se representados na tabela 6.15.

**Tabela 6.15 –Taxa de falhas calculada para os equipamentos Duocondex e Granulador**

Equipamento	$\lambda$
Duocondex	0,001898
Granulador	0,002846

O equipamento com uma maior taxa de falhas é efetivamente o Granulador pois é o que apresenta um MTBF menor, pela maioria de falhas que apresenta ao longo do período de estudo.

A fiabilidade do sistema reparável com taxa de falhas constante, num período de tempo  $\Delta t$  pode então ser determinada pelo modelo exponencial negativo. A representação gráfica da fiabilidade de cada equipamento encontra-se representada na figura 6.10.



**Figura 6.10 – Fiabilidade dos equipamentos Duocondex e Granulador**

As intervenções realizadas no equipamento Duocondex encontram-se listadas na tabela 6.16 assim como o tempo de reparação correspondente a cada causa que motivou a intervenção.

**Tabela 6.16 – Causas de falha do equipamento Duocondex**

Causas	Nº de intervenções	Tempo de reparação (horas)
Limpeza do filtro cónico do sobre pressor	4	2,00
Anomalia na válvula SV5	1	1,00
Rutura nível LIS	1	0,50
Anomalia na regeneração de ar	2	0,75

A principal causa de paragem devido a uma intervenção no equipamento Duocondex foi a limpeza do filtro cónico do sobre pressor que levou a um tempo de paragem de 2 horas.

As causas de paragem devido a falhas no Granulador encontram-se listadas na tabela 6.17, assim como o número de intervenções por causa e tempo de reparação de cada uma delas.

**Tabela 6.17 - Causas de falha do equipamento granulador**

Causas	Nº de intervenções	Tempo de reparação (horas)
Encravamento (excesso CO)	4	1,83
Parafuso partido no estator	2	4,50
Encravamento material da tremonha de alimentação	2	0,58
Anomalia no sensor de segurança da tremonha de alimentação	1	0,50

O encravamento do Granulador por excesso de CO teve o maior número de intervenções, 4 no total, contudo o maior tempo de paragem (4,50 horas) dá-se pelo parafuso partido no estator. Este excesso de CO aciona o sensor CO existente na zona de trituração que faz parar a máquina automaticamente.

A verificação diária do estado do parafuso do Granulador faz parte do plano de manutenção preventiva da empresa pelo que houve uma falha na deteção do seu estado deteriorado por parte do operador.

### 6.2.6. Sistema reparável com taxa de falhas crescente

Através da aplicação do teste de Laplace concluiu-se que o equipamento Silo se comporta segundo um PPNH, com um valor de teste francamente positivo. Como os intervalos entre intervenções se manifestaram sistematicamente menores, sabemos que estamos perante um PPNH com taxa de falhas crescente, o que caracteriza a fase III da curva da banheira. Nesta situação dever-se-á averiguar a qualidade das intervenções feitas ao equipamento, reduzir o intervalo de tempo entre manutenções preventivas e indagar a existência das causas passíveis de provocar os problemas notados e que provoquem tal crescimento (Leitão, 2009).

Neste caso em particular sabemos que devemos partir da causa que motiva o estrangulamento do Silo, pois a empresa detém de um plano de manutenção preventiva bem definido.

A partir das expressões 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25, procedeu-se ao cálculo das variáveis  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{\lambda}$ ,  $\rho$  e CMTBF respetivamente:

$$\hat{\beta} = \frac{n_f}{\sum_{i=1}^{n_f} \ln\left(\frac{T}{\tau_i}\right)} = 2,50 \quad (6.22)$$

Como  $\beta > 1$  confirma-se que o PPNH tem uma taxa de falhas crescente, ou seja existe uma tendência para a diminuição dos intervalos de tempo entre falhas, o que é normal acontecer quando o equipamento se degrada progressivamente.

Procedeu-se ainda ao cálculo das restantes variáveis necessárias ao cálculo do CMTBF:

$$\hat{\lambda} = \frac{n_f}{T^{\hat{\beta}}} = 6,3 \times 10^{-8} \quad (6.23)$$

$$\rho(4216) = 2,50 \times (6,3 \times 10^{-8}) \times 4216^{2,50-1} = 0,042 \quad (6.24)$$

$$CMTBF = \frac{1}{\rho(\tau)} = \frac{1}{0,042} = 23,78 \quad (6.25)$$

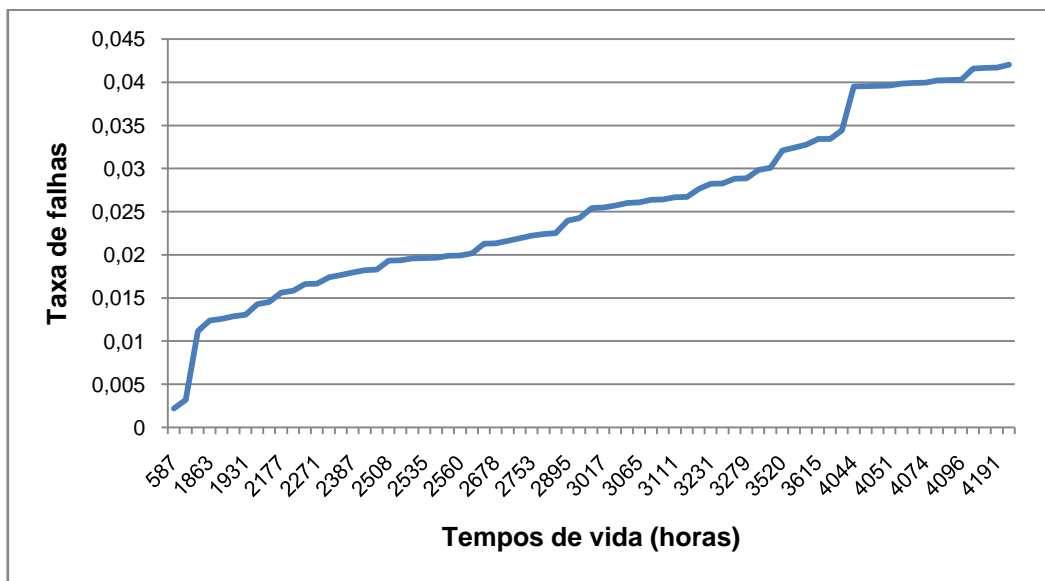
A análise feita a este equipamento permitiu reunir os indicadores fiabilísticos apresentados na tabela 6.18, estimados pelo modelo de Crow.

**Tabela 6.18 – Estimativa do valor CMTBF e seus limites para o Silo**

Equipamento	CMTBF (horas)	Limite Inferior	Limite Superior
	$\hat{\theta}$	$\hat{\theta}_i(\tau)$	$\hat{\theta}_s(\tau)$
Silo	23,78	17,97	32,24

Este equipamento apresenta um CMTBF de 23,78 horas, ou seja, pode concluir-se que em média e aproximadamente todos os dias ocorre uma falha neste equipamento.

Com a taxa de avarias determinada é possível obter o gráfico da figura 6.11, representativo da evolução da taxa de falhas do equipamento reparável Silo até à última falha durante o horizonte temporal estudado.



**Figura 6.11 - Taxa de avarias do Silo em função do tempo de vida**

É notória a tendência crescente da taxa de falhas do Silo, já verificada pelo teste de Laplace.

Com recurso ao *software Statistica v.12* foram estimados os parâmetros da distribuição de *Weibull* que melhor se ajustam aos dados do tempo de vida do equipamento Silo.

Através da tabela revelada pelo comando *Summary Parameters* do *software*, é possível verificar que os parâmetros forma e escala do equipamento Silo, assumem os valores, 0,65 e 39,96 respetivamente.

Tabela 6.19 – *Summary Parameters*: parâmetros forma e escala do equipamento Silo

ML Estimates for 2-Parameter Weibull Distribution Silo; Censoring: Censura (1,0) N=72 Censored:1					
Param.	Param. Value	Asympt. Std.Err.	-95,0% LCL	+95,0% UCL	Covarnce Shap/Scl
Location	0,00000				
Shape	0,65581	0,054920	0,55654	0,77279	
Scale	39,96017	7,667800	27,43428	58,20510	0,140046

As funções densidade de probabilidade ( $f(t, \eta, \beta)$ ), a função de distribuição de probabilidade ( $F(t, \eta, \beta)$ ) e a função de fiabilidade ( $R(t, \eta, \beta)$ ), do equipamento Silo para os valores de parâmetros de forma e escala determinados são dadas respetivamente pelas equações seguintes.

A função densidade de probabilidade é obtida através a equação 6.26:

$$f(t; 39,96; 0,65) = \frac{0,65}{39,96} \times \left[ \frac{t}{39,96} \right]^{0,65-1} \times e^{\left[ -\left( \frac{t}{39,96} \right)^{0,65} \right]} \quad (6.26)$$

A função acumulada de probabilidade  $F(t)$ , é obtida através da equação 6.27:

$$F(t; 39,96; 0,65) = 1 - e^{\left[ -\left( \frac{t}{39,96} \right)^{0,65} \right]} \quad (6.27)$$

Na figura 6.12 apresenta-se o gráfico da função acumulada de probabilidade para este equipamento revelada pelo *software*.

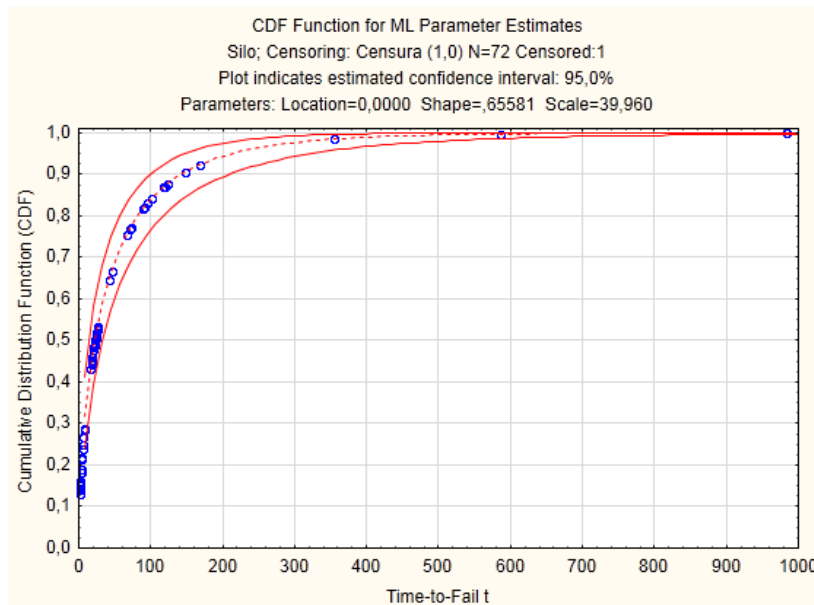
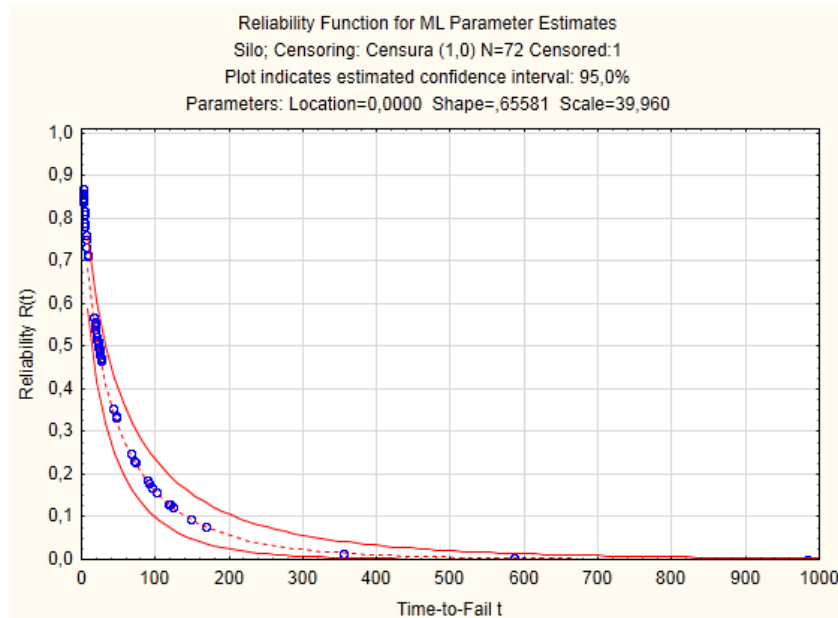


Figura 6.12 - Função acumulada de probabilidade do equipamento Silo

A partir da equação 6.28 obteve-se a função fiabilidade do equipamento Silo, função representada pelo gráfico da figura 6.13 retirado do *software*:

$$R(t; 39,96; 0,65) = 1 - F(t; 39,96; 0,65) = e^{\left[-\left(\frac{t}{39,96}\right)^{0,65}\right]} \quad (6.28)$$



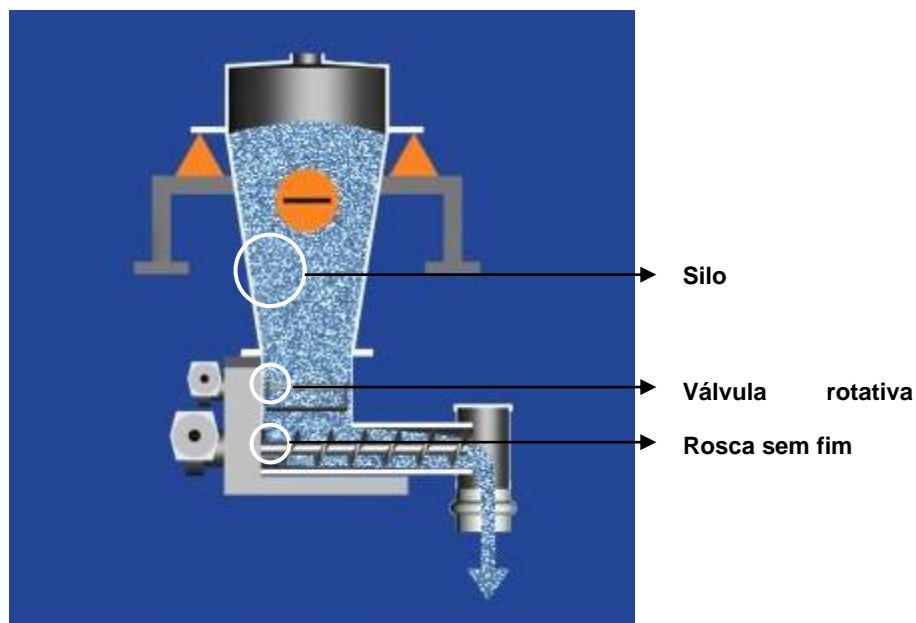
**Figura 6.13 - Fiabilidade do equipamento Silo**

### 6.3. Propostas às principais causas de paragem da linha 3

Neste ponto serão avaliados os principais problemas de paragem da linha 3, avaliação mais pormenorizada das causas de falhas, e feitas propostas com vista à solução ou sua possível melhoria.

#### 6.3.1. Análise Silo

A função do Silo é a de armazenar, em pressão negativa, a espuma do processo para que esta seja posteriormente transportada para a prensa Peletizadora. O Silo tem na parte inferior uma válvula rotativa eclusa que controla o caudal de espuma que dele sai por um transportador de parafuso rosca sem fim. Estes dois componentes do Silo podem ser observados na figura 6.14.



**Figura 6.14 – Representação do Silo e seus componentes**

Fonte: AZO (2015)

O principal motivo de paragem da linha por fatores relacionados com este equipamento é o enchimento deste.

**Tabela 6.20 – Número de ocorrências e tempo de paragem em horas resultantes do Silo cheio**

Causa	Nº ocorrências	Tempo de paragem (horas)
Silo cheio	71	53,17

Como se pode constatar pela análise da tabela 6.20, no período em estudo contabilizam-se 71 intervenções num total de aproximadamente 53,17 horas, em média 50 minutos por intervenção. Interessa pesar este tempo de paragem por Silo cheio na produção total relativamente às perdas.

Tendo em conta que a velocidade real calculada é de 0,036 frigoríficos/hora e o Silo cheio resulta num tempo total de paragem de 53,17 horas, é possível calcular através da expressão 6.29, uma simples regra de três simples, os frigoríficos perdidos por paragens motivadas por Silo cheio.

$$\frac{53,17 \text{ h}}{0,036 \text{ h/frigorifico}} = 1477 \text{ frigorificos} \quad (6.29)$$

Perderam-se 1477 frigoríficos em 6 meses, por paragens por Silo cheio.

Considera-se que o Silo está cheio quando deixa de conseguir dar vazão a todo o material (espuma) que nele entra. Quando tal acontece a produção tem de ser parada até que os níveis de espuma que lá constam sejam razoáveis, ou seja, tem de se aguardar até o Silo dar vazão a todo o material nele existente (vaze), e cessar desta forma o estrangulamento do processo que daí resultou. Conclui-se

que o Silo e seus componentes não têm capacidade para processar todo o material, não estando por isto a escoar como deveria, sendo lento para a produção que se exige.

De acordo com as observações efetuadas a válvula pode não conseguir alimentar a Peletizadora como deveria de acordo com os níveis de produção que se tem. A sugestão para colmatar esse problema pode passar por:

- Aumentar a velocidade da válvula rotativa;
- Re-dimensionar esta para que a quantidade de espuma transportada seja superior;
- Aumentar a área de alimentação à válvula, ou seja, aumentar a eficiência do agitador.

A primeira sugestão foi experimentada mas sem melhorias, o Silo continuou a mostrar-se lento em relação à produção, enchendo variadas vezes, pelo que se analisará a hipótese de alterá-la.



**Figura 6.15 – Válvula rotativa eclusa utilizada no Silo pela Recielectric**

Características da válvula existente:

- 300 mm de diâmetro;
- 440 mm de comprimento;
- 8 cavidades;
- Marca NESTRO;
- Capacidade produtiva em volume: 6 m<sup>3</sup>/h
- Densidade aparente da espuma: 135 kg/m<sup>3</sup>
- Capacidade produtiva em peso: 810 kg/h

A partir de dados resultantes de uma auditoria feita na linha a Novembro do ano de 2014, cada frigorífico teria aproximadamente 7,86 kg de espuma. Este valor foi portanto obtido durante o período em estudo.

Através do inverso do tempo de ciclo real, que recordando é de 0,036 horas/frigorífico obtém-se o número de frigoríficos que foram processados em média por hora:

$$\frac{NPR}{TF} = \frac{27152}{992,25} = 27,36 \text{ frigorificos/hora} \quad (6.30)$$

Em média são processados 28 frigoríficos/hora que se podem fazer corresponder diretamente com o valor recolhido em auditoria de 7,86 kg de espuma por frigorífico, logo é fácil aferir que numa hora são processados 215 kg de espuma. Este é o valor que o Silo deverá processar para dar vazão a todas as entradas.

### 6.3.2. Análise da Peletizadora

A Peletizadora transforma a espuma em peletes (produto final deste equipamento que é transportado para *big bags* exteriores) para maximizar a extração de gás desta.



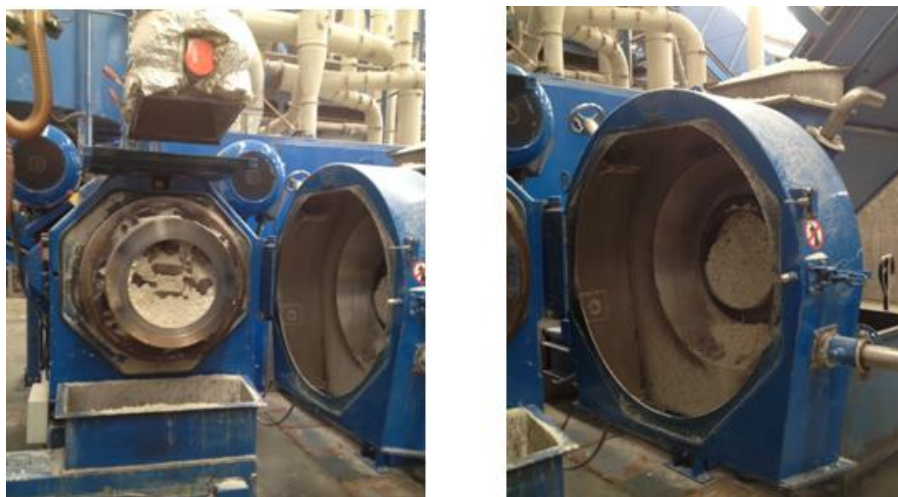
Figura 6.16 –Peletizadora usada na Recielectric

As causas de paragem da Peletizadora encontram-se listadas na tabela 6.21:

Tabela 6.21 – Causas de paragem do equipamento Peletizadora

Causas	Nº intervenções	Tempo de reparação (horas)
Encravamento	38	31,58
Substituição da matriz	1	44,50
Afinação de rolos	1	0,50

O principal motivo de intervenção no equipamento Peletizadora é o encravamento desta. Como se pode constatar pela análise da tabela 6.21, no período em estudo contabilizam-se 38 intervenções num total de aproximadamente 31,58 horas, em média 50 minutos por intervenção. A figura 6.17 ilustra o resultado deste encravamento.



**Figura 6.17 – Peletizadora com encravamento**

Tendo em conta que a velocidade real calculada é de 0,036 frigoríficos/hora e o tempo total de paragem pelo encravamento da Peletizadora é de 31,58 horas, calculou-se de igual modo ao efetuado para o Silo, os frigoríficos perdidos por paragens motivadas por encravamento da Peletizadora.

$$\frac{31,58 \text{ h}}{0,036 \text{ h/frigorífico}} = 878 \text{ frigoríficos} \quad (6.31)$$

Perderam-se 878 frigoríficos em 6 meses, por paragens por encravamento da Peletizadora.

Avaliados durante o período de estudo os problemas deste equipamento, que levam ao encravamento:

- A espuma que vem da tremonha de alimentação e acumula-se na tremonha não chegando à Peletizadora, levando ao encravamento, a espuma não escoar e faz parar o sistema;
- Forma-se pasta de espuma por condensações. Nota-se a presença de humidade no interior da parede de escoamento para a matriz motivo pela qual se forma esta pasta de espuma;
- A espuma quando muito leve não desce.

A figura 6.18 ilustra o problema da formação de pasta de espuma por presença de humidade.

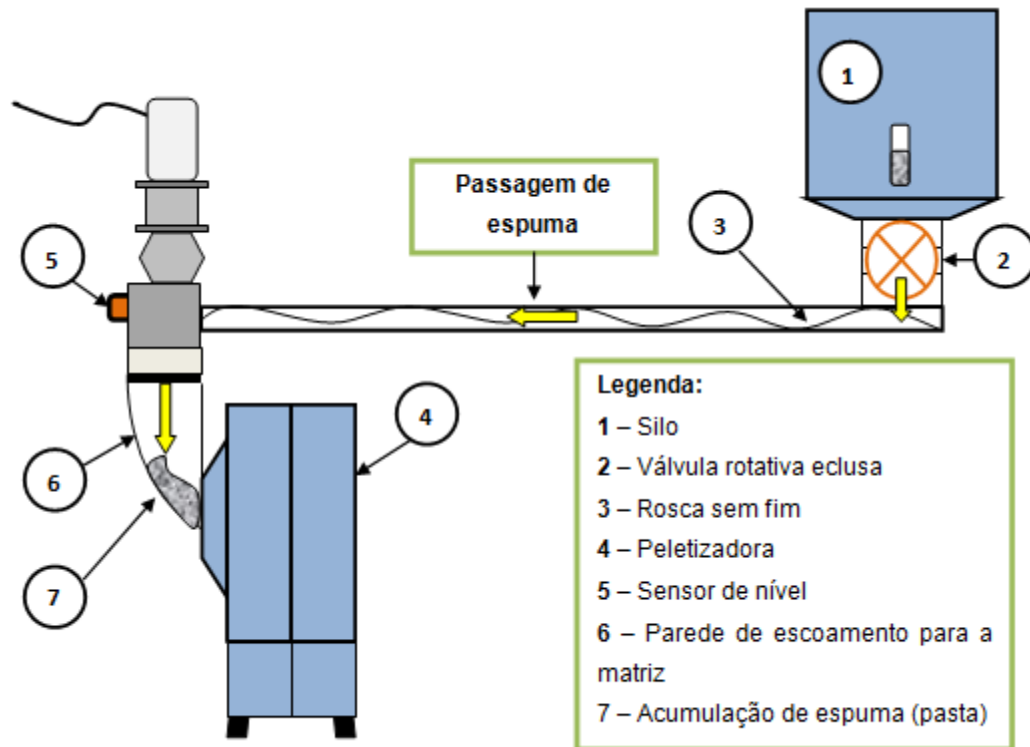


**Figura 6.18 – Humidade presente no interior da parede de escoamento da Peletizadora**

A parede interior de escoamento da figura 6.18 é de aço inox polido exatamente para diminuir o atrito e o material escoar facilmente.

As propostas de acordo com os problemas detetados:

- Instalação de um motor vibratório que introduzirá vibração na parede de escoamento (ponto 6 da figura 6.19) para fazer o material que se encontra “preso” no interior se desprenda e mova para o interior da matriz;
- Instalação de uma rosca sem fim;



**Figura 6.19 – Representação esquemática do sistema Silo e Peletizadora**

Esta primeira sugestão já se encontra em teste e tem tido resultados satisfatórios na melhoria do problema detetado.

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES FINAIS

---

As paragens motivadas por falhas nos equipamentos são geralmente uma das principais causas de não produtividade e conseqüentemente baixos níveis de desempenho. Um correto desempenho dos equipamentos que constituem o sistema produtivo no que respeita à sua fiabilidade e disponibilidade constitui um dever do setor da manutenção, existindo nos dias de hoje, uma grande pressão para uma produção contínua e melhorada, pelo que é fundamental avaliar o sistema de produção de forma a tomar as melhores decisões de melhoria de fiabilidade realizadas nos equipamentos.

A partir da ordem cronológica das falhas, foi possível avaliar o comportamento do sistema assim como dos seus equipamentos críticos em termos da sua fiabilidade, taxa de avarias, manutibilidade e disponibilidade, e com base nestes indicadores aferir qual o comportamento de cada equipamento no que respeita às falhas. Para melhoria da linha 3 é fulcral conhecer a capacidade produtiva da linha e das variáveis que influenciam o rendimento desta.

Para posterior cálculo de alguns indicadores de desempenho considerados de maior pertinência procedeu-se à análise dos vários tempos de estado da linha de produção em estudo. A análise feita ao histórico de paragens no sistema revelou um tempo total de observação durante os 6 meses avaliados de 1547,22 horas. O tempo de paragens próprias cuja causa de paragem pertence ao meio de fabricação, é constituído por paragens motivadas por falhas nos equipamentos e que exigem por isso manutenções de carácter corretivo ou por outros fatores como encravamentos, substituições, anomalias várias, limpezas ou reparações nos vários equipamentos e por tempos de paragens funcionais, como controlos de qualidade, afinações, regulações ou controlo a vários indicadores de nível. Cerca de 17,25% (266,83 horas) do tempo total de observação corresponde a paragens próprias. No período em estudo o tempo de paragens induzidas é constituído por tempos de paragem induzidos por falhas no fornecimento de energia e corresponde a 0,20% (3,17 horas) do tempo total e o tempo não requerido, durante o qual, como já referido, não se prevê produção é constituído por tempos em manutenções programadas (preventivas), e tempos ocupados com testes de qualidade à linha, programados e feitos por empresas externas (teste RAC, teste arcas, teste weelabex), auditorias externas e formações internas (sistemas de gestão e qualidade do ambiente) e corresponde a 18,42% (284,97 horas) do tempo total de observação. Concluiu-se ainda que durante o tempo total de observação, ou seja, durante o tempo total de trabalho na linha, apenas em 64,13% desse tempo se produz.

Com recurso aos vários indicadores de disponibilidade concluiu-se que a linha 3 esteve disponível para produzir durante 78,61% do tempo requisitado para tal (tempo requerido), e indisponível 21,19% do tempo devido a paragens próprias e 0,25% por paragens induzidas. Em suma, 21,39% do tempo em que se previa produção foi perdido.

O cálculo do rendimento operacional, indicador que pretende administrar as seis perdas produtivas apontadas pela TPM, obteve-se através da multiplicação dos fatores disponibilidade, rendimento velocidade e qualidade, permitindo aferir um valor de 0,366.

A partir da informação contida no histórico de dados reais recolhido, dos tempos de falhas ordenados cronologicamente, procedeu-se à análise das causas passíveis de provocar interrupções no sistema linha 3 e que contribuem inevitavelmente para o tempo não produtivo da linha considerando que deixam de estar reunidas as condições necessárias para que a produção prossiga de forma contínua e dentro dos padrões considerados normais.

Como foi possível aferir pela primeira análise aos tempos de estado do sistema linha 3, as paragens próprias são aquelas que levam a maiores perdas produtivas, por terem um maior tempo de paragem dentro do tempo total. Sendo estas paragens relacionadas com os equipamentos, procedeu-se à análise das causas mais frequentes de falhas nestes assim como as intervenções que manifestaram um maior tempo de reparação.

Com recurso ao diagrama de Pareto foi possível determinar os equipamentos mais determinantes na ocorrência de paragens, permitindo desta forma estabelecer prioridades de atuação evitando o desperdício de esforços no combate a causas que não tem grande efeito na manifestação do problema. Concluiu-se que os equipamentos que mais contribuem para a ocorrência de uma paragem são as paragens do Silo com 71 falhas verificadas, correspondentes a 49% das falhas totais, e da Peletizadora (28%) responsáveis por cerca de 80% do número total de falhas verificadas durante o período considerado, sendo então os equipamentos classificados como classe A e neste tipo de análise os equipamentos a que se deve dar maior relevância, e foco de atuação. Pelo tempo de paragem que origina determinada falha, foi realizada outra análise com recurso ao mesmo diagrama e conclui-se que 80% do tempo de paragem relativamente a falhas se deve a falhas nos equipamentos Peletizadora (30%), Comporta de segurança (30%) e Silo (21%), notando-se que a Comporta de segurança apenas contabiliza uma única falha em todo o período de observação, apesar desta originar um tempo de reparação e conseqüente não produtividade, bastante grande, o mesmo acontecendo com o Triturador. Os equipamentos Granulador e Duocondex pertencentes à classe de média relevância foram também foco de análise.

Com base no mesmo registo histórico de falhas procedeu-se à análise de comportamento tanto do sistema linha 3, como dos seus subsistemas, em termos de fiabilidade. Procedeu-se à análise da tendência dos dados sob o ponto de vista do processo estocástico e para um determinado nível de significância, recorreu-se ao teste de Laplace para concluir se o sistema reparável em análise se comportaria segundo um PPH ou segundo um PPNH, verificando assim se a taxa de falhas é constante ou apresenta alguma tendência.

A análise de tendência ao sistema reparável linha 3 através da aplicação do teste de Laplace permitiu concluir que a taxa de falhas deste se considera constante pelo que o sistema se comporta segundo um PPH, com uma estimativa para o valor do MTBF de 29,28 horas. Esta análise foi feita a cada equipamento apontado anteriormente como foco de atuação analisando de igual modo (através da aplicação do teste de Laplace) as falhas de cada equipamento, e concluir quais são os mais críticos em termos de fiabilidade.

Analisando os resultados dos valores da estatística teste obtidos para cada equipamento, concluiu-se que os equipamentos Duocondex e Granulador apresentam uma taxa de falhas constante ou seja

manifestam um comportamento relativamente às falhas constante, o equipamento Peletizadora uma taxa de falhas decrescente e o equipamento Silo uma taxa de falhas crescente.

O MTBF para os equipamentos cuja taxa de falhas se manifestou constante foram calculados de forma direta, apresentando o equipamento Duocondex um MTBF de 526,97 horas e um MTBF mínimo de 324,42 horas e o equipamento Granulador um MTBF de 351,31 horas e um MTBF mínimo de 237,08 horas, valor bastante inferior ao do Duocondex por ter um número de falhas superior. Os equipamentos Peletizadora e Silo que denunciaram tendência nas suas taxas de falhas, ou seja, que se comportam segundo um PPNH, não permitem o cálculo do MTBF pois os tempos entre falhas não são constantes pelo que se recorreu ao CMTBF. Esta estimativa é feita através do modelo de Crow.

A principal causa de paragem devido a uma intervenção no equipamento Duocondex foi a limpeza do filtro cónico do sobre pressor que levou a um tempo de paragem de 2 horas. Já no Granulador a maior causa de paragem, pelo maior número de intervenções, foi o seu encravamento por excesso de CO, contabilizando 4 intervenções durante o tempo de observação. Contudo o maior tempo de paragem (4,50 horas) dá-se pelo parafuso partido no estator. A verificação diária do estado do parafuso do granulador faz parte do plano de manutenção preventiva da empresa pelo que houve uma falha na deteção do seu estado deteriorado por parte do operador.

O equipamento Peletizadora apresentou um CMTBF de 202,66 horas permitindo afirmar que aproximadamente de 8 em 8 dias existe uma falha neste equipamento, valor bastante inferior aos valores de MTBF apresentados para os equipamentos Duocondex e Granulador como já seria de esperar visto a Peletizadora falhar com uma frequência muito maior.

O decréscimo de falhas notado na Peletizadora pode ter sido motivado pela substituição da matriz que a constituía. Esta substituição teve como objetivo resolver os sucessivos encravamentos na Peletizadora ou pelo menos diminuí-los e pode ter solucionado parte dos problemas que levavam ao encravamento desta.

Como já referido o equipamento Silo apresenta uma taxa de falhas crescente, apresentando intervalos entre intervenções sistematicamente menores. Nesta situação dever-se-á averiguar a qualidade das intervenções feitas ao equipamento, reduzir o intervalo de tempo entre manutenções preventivas e indagar a existência das causas passíveis de provocar os problemas notados e que provoquem tal crescimento (Leitão, 2009).

Neste caso em particular sabemos que devemos partir da causa que motiva o estrangulamento do Silo, pois a empresa detém de um plano de manutenção preventiva bem definido. Este equipamento apresentou um CMTBF de 23,78 horas, ou seja, em média e aproximadamente todos os dias ocorre uma falha neste equipamento.

Recorreu-se ao *software Statística V.12* para estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull que melhor se ajustariam aos dados do tempo de vida dos equipamentos com tendência na sua taxa de falhas, e a partir destes parâmetros foram definidas as suas funções densidade de probabilidade, distribuição de probabilidade e fiabilidade.

Por fim foram avaliados os principais problemas de paragem da linha 3 em cada um dos equipamentos considerados críticos (Silo e Peletizadora) e feitas propostas com vista à sua solução ou possível melhoria.

A função do equipamento Silo é a de armazenar, em pressão negativa, a espuma do processo para que esta seja posteriormente transportada para a prensa Peletizadora. O Silo tem na parte inferior uma válvula rotativa eclusa que controla o caudal de espuma que dele sai por um transportador de parafuso rosca sem fim. O principal motivo de paragem da linha por fatores relacionados com este equipamento é o seu enchimento, contabilizando-se 71 intervenções num total de aproximadamente 53,17 horas, em média 50 minutos por intervenção. Perderam-se 1477 frigoríficos em 6 meses, por paragens por Silo cheio.

Considera-se que o Silo está cheio quando deixa de conseguir dar vazão a todo o material (espuma) que nele entra. Quando tal acontece a produção tem de ser parada até que os níveis de espuma que lá constam sejam razoáveis, ou seja, tem de se aguardar até o Silo dar vazão a todo o material nele existente (vaze), e cessar desta forma o estrangulamento do processo que daí resultou. Conclui-se que o Silo e seus componentes não têm capacidade para processar todo o material, não estando por isto a escoar como deveria, sendo lento para a produção que se exige. De acordo com as observações efetuadas a válvula pode não conseguir alimentar a Peletizadora como deveria de acordo com os níveis de produção que se tem. As sugestões possíveis para colmatar esse problema são: (i) a de aumento da velocidade da válvula rotativa (ii) redimensionar a válvula rotativa para que a quantidade de espuma transportada seja superior e (iii) aumentar a área de alimentação à válvula ou seja, aumentar a eficiência do agitador.

A primeira sugestão foi testada contudo não se mostrou benéfica, o Silo continuou a mostrar-se lento em relação à produção, pelo que se aconselha as duas opções seguintes. Para redimensionar a válvula rotativa é necessário saber qual o valor que o Silo necessita processar para dar vazão a todas as entradas de material.

A partir de dados resultantes de uma auditoria feita na linha a Novembro de 2014, cada frigorífico teria aproximadamente 7,86 kg de espuma. O tempo de ciclo real foi calculado em 0,036 horas/frigorífico e através do seu inverso obteve-se o número de frigoríficos que foram processados em média por hora. Concluiu-se que em média são processados 28 frigoríficos/hora, pelo que numa hora são processados 215 kg de espuma. Este é o valor que o Silo deverá processar para dar vazão a todas as entradas.

A Peletizadora tem como função a transformação da espuma em peletes (produto final deste equipamento que é transportado para *big bags* exteriores) para maximizar a extração de gás desta.

O principal motivo de intervenção no equipamento Peletizadora é o seu encravamento, contabilizando-se no período em estudo, 38 intervenções num total de aproximadamente 31,58 horas, em média 50 minutos por intervenção. Perderam-se 878 frigoríficos em 6 meses, por paragens por encravamento da Peletizadora.

Os problemas analisados que levam aos encravamentos da Peletizadora são: (i) a espuma que vem da tremonha de alimentação e acumula-se na tremonha não chegando à Peletizadora, levando ao encravamento, a espuma não escoar e faz parar o sistema, (ii) forma-se pasta de espuma por condensações notando-se a presença de humidade no interior da parede de escoamento para a matriz motivo pela qual se forma esta pasta de espuma e (iii) a espuma quando muito leve não desce.

As propostas para trabalhos futuros de acordo com os problemas detetados são a da instalação de um motor vibratório que introduzirá vibração na parede de escoamento para fazer o material que se encontra “preso” no interior se desprender e mover para o interior da matriz ou a da instalação de uma rosca sem fim. É de notar ainda a grande importância no registo, organização e tratamento de dados.



## Bibliografia

- Ahuja, I., & Khamba, J. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions. *Journal Of Quality In Maintenance Engineering*, 25(7), 709-756. doi:10.1108/02656710810890890
- Allison, P. (2010). *Survival analysis using SAS*. Cary, NC: SAS Institute.
- Amb3e (2013). *Relatório e contas 2013*. Retrieved 15 June 2015, from [http://www.amb3e.pt/Cache/binImagens/AMB3E\\_relatorio\\_contas\\_2013\\_compress-2404.pdf](http://www.amb3e.pt/Cache/binImagens/AMB3E_relatorio_contas_2013_compress-2404.pdf)
- Amb3e (2014). *Relatório e contas 2014*. Retrieved 15 June 2015, from [http://www.amb3e.pt/Cache/binImagens/AMB3E\\_relatorio\\_contas\\_2014\\_vfinal\\_CLC\\_RPCF-2521.pdf](http://www.amb3e.pt/Cache/binImagens/AMB3E_relatorio_contas_2014_vfinal_CLC_RPCF-2521.pdf)
- Amb3e (2015). *Amb3e*. Retrieved 13 June 2015, from <http://www.amb3e.pt/>
- AMBIGROUP (2011). *Ambinews*, 17(1).
- AMBIGROUP (2015). *Ambinews*, 29(1), 5-9.
- Anreee (2015). *ANREEE*. Retrieved 11 June 2015, from <https://www.anreee.pt/>
- APA (2015). *Principais Resultados de Gestão 2013*. Retrieved 23 June 2015, from [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Politicadas/Residuos/FluxosEspecificosResiduos/REEE/Resultados\\_REEE\\_2013\\_Portal\\_v2.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Politicadas/Residuos/FluxosEspecificosResiduos/REEE/Resultados_REEE_2013_Portal_v2.pdf)
- APMI (2013). *APMI*. Retrieved 19 June 2015, from <http://www.apmi.pt/>
- Ascher, H., & Feingold, H. (1984). *Repairable systems reliability*. New York: M. Dekker.
- Assis, R. (1997). *Manutenção Centrada na Fiabilidade: Economia das decisões*. Lisboa: Lidel.
- Assis, R. (2004). *Apoio à Decisão em Gestão da Manutenção: Fiabilidade e Manutenibilidade*. Lisboa: Lidel.
- Assis, R. (2010). *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*. Lisboa: Lidel.
- Assis, R. (2013). Como avaliar se um equipamento deve ou não ser substituído na perspectiva de um Gestor de Activos. In *Congresso APMI*. Cascais. Retrieved from [http://www.rassis.com/artigos/Manutencao/Artigo\\_Rui%20Assis\\_Congresso\\_APMI\\_2013.pdf](http://www.rassis.com/artigos/Manutencao/Artigo_Rui%20Assis_Congresso_APMI_2013.pdf)
- Baldé, C., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. (2015). *The global e-waste monitor 2014*. Bonn: United Nations University, Institute for the advanced study on sustainability.
- Borris, S. (2006). *Total productive maintenance*. New York: McGraw-Hill.

- Brito, M. (2003). *Manual Pedagógico PRONACI Manutenção*. Leça da Palmeira: Eurisko - Estudos, Projectos e Consultadoria, S.A.
- Cabral, J. (1998). *Organização e gestão da manutenção : dos conceitos à prática...* (3th ed.). Lisboa, Porto, Coimbra: Lidel.
- Cabral, J. (2006). *Organização e Gestão da Manutenção dos conceitos à prática...* (5th ed.). Lisboa: Lidel.
- Cabral, R. (2013). *Green Savers*. Retrieved 16 June 2015, from <http://greensavers.sapo.pt/2013/05/16/rui-cabral-anreee-estamos-a-identificar-e-sensibilizar-1000-empresas/>
- Chase, R., & Aquilano, N. (1989). *Gestão da Produção e das Operações - Perspectiva do Ciclo de Vida*. Lisboa: Monitor.
- Decreto-Lei n.º 67/2014 de 7 de maio. *Diário da República nº 87 – I Série*. Retrieved from [www.dre.pt](http://www.dre.pt)
- Decreto-Lei nº 230/2004 de 10 de Dezembro. *Diário da República nº 288 - I Série A*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Lisboa. Retrieved from [www.dre.pt](http://www.dre.pt)
- Despacho conjunto nº 353/2006 de 27 de Abril. *Diário da República nº 82 - II Série*. Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação. Lisboa. Retrieved from [www.dre.pt](http://www.dre.pt)
- Despacho conjunto nº 354/2006 de 27 de Abril. *Diário da República nº 82 - II Série*. Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação. Lisboa. Retrieved from [www.dre.pt](http://www.dre.pt)
- Dhillon, B. (2002). *Engineering maintenance*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Dias, J. (2002). *Fiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica* (PhD Thesis). Universidade Nova de Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Dias, J., Requeijo, J., Leal, R., & Pereira, Z. (2007). Otimização do período de substituição preventiva de componentes em função dos custos. In *8º Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica*. Cusco. Retrieved from <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/12/12-13.pdf>
- Didelet, F. (2003a). *Modelos de Fiabilidade e Disponibilidade* (1st ed.). Instituto Politécnico de Setúbal. Retrieved from [http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/\\_private/folmod4.pdf](http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/_private/folmod4.pdf)
- Didelet, F., & Viegas, J. (2003). *Manutenção* (1st ed.). Retrieved from [http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/\\_private/folhas\\_manutencao.pdf](http://ltodi.est.ips.pt/jviegas/_private/folhas_manutencao.pdf)

- Didelet, F., & Viegas, J. (2003b). *Manutenção* (1st ed.). Instituto Politécnico de Setúbal. Retrieved from [http://lodi.est.ips.pt/jviegas/\\_private/folhas\\_manutencao.pdf](http://lodi.est.ips.pt/jviegas/_private/folhas_manutencao.pdf)
- Diretiva 2002/96/CE de 27 de Janeiro. *Jornal Oficial da União Europeia nº 37/24 – Série L*. Parlamento Europeu e do Conselho. Lisboa
- Diretiva 2012/19/EU de 4 de Julho. *Jornal Oficial da União Europeia nº 197/38 – Série L*. Parlamento Europeu e do Conselho. Lisboa
- Ebeling, C. (1997). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. New York: McGraw Hill.
- Erp-recycling (2015). *ERP-recycling*. Retrieved 10 June 2015, from <http://www.erp-recycling.pt/>
- Eurostat (2015). Retrieved 23 May 2015, from <http://ec.europa.eu/eurostat>
- Farinha, J. (1997). *Manutenção das instalações e equipamentos hospitalares*. Coimbra: Minerva.
- Fernandes, J., & Rebelato, M. (2006). Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. *Gest. Prod.*, 13(2), 245-259. doi:10.1590/s0104-530x2006000200007
- Ferreira, L. (1998). *Uma introdução à manutenção*. Porto: Publindústria.
- Filipe, F. (2006). *Gestão e Organização da Manutenção de Equipamento de Conservação e Manutenção de Infra-Estruturas Ferroviárias* (MasterThesis). Universidade do Porto: Faculdade de engenharia.
- Huisman, J. (2013). *(W)EEE Mass balance and market structure in Belgium*. Delft. Retrieved from [http://isp.unu.edu/publications/scycle/files/Recupel\\_Report.pdf](http://isp.unu.edu/publications/scycle/files/Recupel_Report.pdf)
- Kalbfleisch, J., & Prentice, R. (1980). *The statistical analysis of failure time data*. New York: Wiley.
- Kalbfleisch, J., & Prentice, R. (2002). *The statistical analysis of failure time data*. Hoboken, N.J.: J. Wiley.
- Kaplan, E., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal Of The American Statistical Association*.
- Lafraia, J. (2001). *Manual de Confiabilidade Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de janeiro: Qualitmark.
- Leitão, A. (1999). *Predição de Falhas no Apoio à Decisão na Gestão da Manutenção*. Bragança. Retrieved from <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1650/1/Artigo2.pdf>

- Monchy, F. (1989). *A função Manutenção: formação para a gerência da Manutenção Industrial*. São Paulo: Ebras.
- Monchy, F. (1996). *La fonction maintenance*. Paris: Masson.
- Monks, J. (1987). *Administração da Produção*. McGraw Hill.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance*. New York: Industrial Press.
- Moubray, J. (2000). *Manutenção centrada em confiabilidade*. Lutterworth: Aladon.
- Nakajima, S. (1993). *Introdução ao TPM: Manutenção produtiva total*. Cambridge: Productivity Press.
- Renault (2001). Norma R E41.50.505.R. Production resources status times and performance monitoring indicators. Retrieved from [http://www.cnomo.com/fichiers/2/14106/E4150505r\\_H\\_en.pdf](http://www.cnomo.com/fichiers/2/14106/E4150505r_H_en.pdf)
- SAE International (2002). Norma SAE JA1012 (2002). A Guide to the Reliability Centered Maintenance (RCM) Standard.
- IPQ (2007). NP EN 13306:2007. Terminologia da manutenção. Instituto Português da Qualidade.
- O'Connor, P. (1991). *Practical reliability engineering*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Pereira, Z., & Requeijo, J. (2012). *Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos* (2nd ed.). Costa da Caparica: FFCT.
- Pinto, C. (1999). *Organização e gestão da manutenção*. Lisboa: Monitor.
- Pinto, V. (1994). *Gestão da Manutenção*. Lisboa: IAPMEI.
- Pinto, V. (2004). *Gestão da Manutenção*. Lisboa: IAPMEI.
- Quintas, A. (1998). Definição de uma estratégia de Manutenção com vista à melhoria de rendimento global da Empresa. In *10º Congresso Ibero-Americano de Manutenção*. Lisboa.
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System reliability theory*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Rinne, H. (2009). *The Weibull distribution*. Boca Raton: CRC Press.
- Ryan, T. (2007). *Modern engineering statistics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.
- Sena, F., & Didelet, F. (2002). Alguns Factores Determinantes na Actual Gestão da Manutenção. *Manutenção*, 72, 4-9.

Takahashi, Y., & Osada, T. (1990). *TPM, total productive maintenance*. Tokyo, Japan: Asian Productivity Organization.

Wireman, T. (2005). *Developing performance indicators for maintenance managing*. New York, NY: Industrial Press.

Zaions, D. (2003). *Manutenção Industrial com Enfoque na Manutenção Centrada em Confiabilidade* (MasterThesis). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.





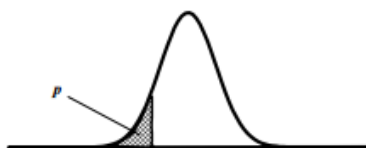
# Anexos

## Anexo 1 – Tabelas do modelo de Crow

Tabela A. 1 – Tabela de Crow para testes limitados por avarias

### Modelo de Crow. Teste limitado por Avarias

(Nível de significância - p)

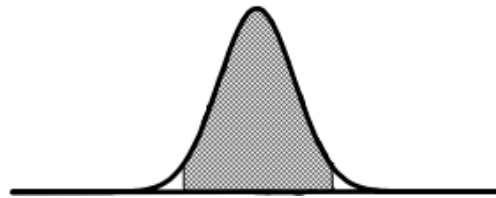


$\frac{p}{n}$	.005	.010	.025	.050	.100	.900	.950	.975	.990	.995
2	.2373	.2944	.4093	.5552	.8055	33.76	72.67	151.5	389.9	783.6
3	.2627	.3119	.4054	.5137	.6840	8.927	14.24	21.96	37.60	55.52
4	.2902	.3363	.4225	.5174	.6601	5.326	7.651	10.65	15.96	21.31
5	.3151	.3603	.4415	.5290	.6563	4.000	5.424	7.147	9.935	12.63
6	.3372	.3815	.4555	.5421	.6600	3.321	4.339	5.521	7.363	9.076
7	.3569	.4003	.4700	.5548	.6555	2.910	3.702	4.595	5.953	7.162
8	.3746	.4173	.4910	.5668	.6720	2.634	3.284	4.002	5.071	5.993
9	.3906	.4327	.5046	.5780	.6787	2.426	2.999	3.589	4.469	5.211
10	.4052	.4467	.5171	.5893	.6852	2.287	2.770	3.265	4.032	4.652
11	.4185	.4595	.5285	.5979	.6915	2.170	2.600	3.051	3.702	4.233
12	.4309	.4712	.5391	.6067	.6975	2.075	2.464	2.870	3.443	3.909
13	.4422	.4821	.5488	.6150	.7033	1.993	2.353	2.721	3.235	3.650
14	.4523	.4923	.5579	.6227	.7097	1.933	2.260	2.597	3.064	3.438
15	.4627	.5017	.5664	.6299	.7139	1.877	2.182	2.493	2.921	3.262
16	.4719	.5106	.5743	.6357	.7183	1.829	2.114	2.404	2.800	3.113
17	.4807	.5189	.5813	.6431	.7234	1.783	2.055	2.327	2.695	2.965
18	.4893	.5267	.5883	.6491	.7276	1.751	2.004	2.259	2.604	2.871
19	.4967	.5341	.5954	.6547	.7320	1.718	1.959	2.200	2.524	2.777
20	.5040	.5411	.6016	.6601	.7360	1.693	1.913	2.147	2.453	2.691
21	.5110	.5478	.6076	.6652	.7398	1.652	1.881	2.099	2.390	2.614
22	.5177	.5541	.6132	.6701	.7434	1.633	1.848	2.055	2.333	2.546
23	.5240	.5601	.6186	.6747	.7469	1.616	1.818	2.017	2.281	2.484
24	.5301	.5659	.6237	.6791	.7502	1.596	1.790	1.982	2.235	2.428
25	.5359	.5714	.6286	.6833	.7534	1.578	1.765	1.949	2.192	2.377
26	.5415	.5766	.6333	.6873	.7565	1.561	1.742	1.919	2.153	2.330
27	.5469	.5817	.6378	.6912	.7594	1.545	1.720	1.892	2.116	2.287
28	.5519	.5865	.6421	.6949	.7622	1.530	1.700	1.866	2.083	2.247
29	.5563	.5912	.6462	.6985	.7649	1.516	1.682	1.842	2.052	2.211
30	.5616	.5957	.6502	.7019	.7676	1.504	1.664	1.820	2.023	2.176
35	.5829	.6158	.6621	.7173	.7794	1.450	1.592	1.729	1.905	2.036
40	.6010	.6323	.6632	.7303	.7894	1.410	1.538	1.660	1.816	1.932
45	.6168	.6476	.6652	.7415	.7991	1.378	1.495	1.605	1.747	1.852
50	.6305	.6605	.7076	.7513	.8057	1.352	1.460	1.562	1.692	1.787
60	.6538	.6823	.7267	.7670	.8184	1.312	1.407	1.496	1.607	1.689
70	.6723	.7000	.7423	.7811	.8283	1.282	1.367	1.447	1.546	1.618
80	.6867	.7148	.7553	.7922	.8375	1.259	1.337	1.409	1.493	1.564
100	.7142	.7384	.7759	.8100	.8514	1.225	1.293	1.355	1.431	1.486

Tabela A. 2 – Tabela de Crow para testes limitados pelo tempo

**Modelo de Crow. Teste limitado por Tempo**

(Intervalo de confiança)



n	CONFIDENCE COEFFICIENT							
	.80		.90		.95		.98	
	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_1$	$\pi_2$
2	.261	18.655	.250	38.661	.159	78.664	.124	108.665
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	3.356	.352	4.517	.300	5.862	.250	8.043
6	.459	2.915	.385	3.764	.331	4.738	.280	6.254
7	.487	2.615	.412	3.298	.358	4.051	.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	2.136	.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	2.503
19	.650	1.663	.583	1.893	.532	2.123	.479	2.432
20	.657	1.633	.591	1.858	.540	2.076	.488	2.369
21	.664	1.615	.599	1.825	.548	2.034	.496	2.313
22	.670	1.594	.606	1.796	.556	1.996	.504	2.261
23	.676	1.574	.613	1.769	.563	1.961	.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	2.093
27	.697	1.511	.636	1.682	.588	1.849	.537	2.063
28	.702	1.493	.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	.729	1.427	.672	1.565	.627	1.699	.579	1.870
40	.745	1.390	.690	1.515	.646	1.635	.593	1.786
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	.678	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

## Anexo 2 – Plano de manutenção Recieletic

### Plano de manutenção – NIVEL 1

Responsável: operador

Periodicidade a aplicar: Diariamente

**Tabela A. 3 – Plano de manutenção preventiva aplicado diariamente**

Equipamento	Componente	Subcomponente	Operações
Triturador	Câmara de fragmentação	Sensores	Limpeza
			Verificação desgaste/corrosão/danos
	Geral	-	Verificação (Limpeza se necessário)
			Verificação desgaste/corrosão/danos
	Lâminas	-	Verificação desgaste/corrosão/danos
	Rotor	-	Verificação desgaste/corrosão/danos
	Unidade Hidráulica	-	Verificação nível do óleo
			Mangueiras
	Unidade de lubrificação	-	Verificação nível
Redutores	Cárter	Verificação temperatura	
Redutores	-	Verificação funcionamento	
		Verificação de fugas	
Sensor de pentano	Sensor	-	Verificação de funcionamento
Sensor CO	Sensor	-	Verificação de funcionamento
Granulador	Lâminas	Parafuso	Verificação
		-	Verificação desgaste/corrosão/danos
	Instalação de lubrificação	-	Verificação folga de corte (ajuste se necessário)
			Verificação nível lubrificante
finas e grossas			-
Tapete transportador 2 - Separação	Tabuleiro recolha de material	-	Limpeza
Overband	Tela	Chapa de cobertura	Verificação desgaste/corrosão/danos
		Parte Interna	Verificação (remoção de material se necessário)
		-	Verificação funcionamento

<b>Transportador vibratório 2 – sob overband</b>	Crivo	Chapa inferior	Verificação (Limpeza se necessário)	
	-	-	Remoção de material acumulado	
<b>Tapete transportador 3 - Ferro</b>	-	-	Limpeza	
<b>Corrente Foucault</b>	Sensor	Superfície	Verificação (Limpeza se necessário)	
	Tambor	-	Verificação (Limpeza se necessário)	
	Tambor	Parafusos	Verificação (Aperto se necessário)	
<b>Crio condensador Duo-Condex</b>	Tubagens	-	Verificação fugas	
	Condensador W1	-	Verificação funcionamento	
	Condensador W3	-	Verificação funcionamento	
<b>Ventiladores axiais do pré-arrefecimento G0.3</b>	Motores M0.3	-	Limpeza	
<b>Sobre pressor de deslocamento positivo</b>	-	-	Descarga condensado	
	Filtro de aspiração	-	Verificação (substituição se necessário)	
	Geral	-	Verificação nível óleo	
<b>Chiller</b>	Manómetro	-	Verificação	
<b>Filtro exterior</b>	Caixas de recolha	-	Verificação (Limpeza se necessário)	
<b>Instalação azoto liquido</b>	Geral	-	Verificação	
	Tubagens	-	Verificação fugas	
		Formação de gelo	Verificação (Limpeza se necessário)	
	Válvulas de segurança	-	Verificação	
<b>Peletizadora</b>	Geral	3 pontos	Lubrificação	
	Lado traseiro da prensa	-	Limpeza	
	Motor direito	2 pontos	Lubrificação	
	Motor esquerdo	2 pontos	Lubrificação	
	Tubagem entre sistema de arrefecimento g	-	Descarga condensado	
	Zona interna	Lâminas e câmara de peletização	-	Limpeza
		Matriz	-	Limpeza
		Placa dianteira	-	Limpeza
		Rolos de prensagem	-	Limpeza
	Instalação de lubrificação	-	Verificação nível lubrificante	
Unidade lubrificação	-	Verificação nível (repor se necessário)		
Filtros metálicos (2)	-	Limpeza		
<b>Sistema refrigeração peletes</b>	-	-	Verificação nível óleo	

**Responsável:** Itens múltiplos

**Periodicidade a aplicar:** Semanalmente

**Tabela A. 4 – Plano de manutenção preventiva aplicado semanalmente**

Equipamento	Componente	Subcomponente	Operações
<b>Tapete transportador 1 principal – correias inclinado</b>	Tela	-	Verificação tensão (ajuste se necessário)
<b>Triturador</b>	Motores 1 e 2	Grelha e aletas	Limpezas
		2 pontos por motor	Lubrificação
	Rotor	Proteção de borracha	Verificação desgaste/corrosão/danos
	Sistema elétrico	-	Verificação
	Uniões roscadas	-	Verificação
	Sistema trituração	4 pontos	Lubrificação
<b>Granulador</b>	Braço de fixação do motor	2 pontos	Lubrificação
	Motor	Aletas e grelhas de ventilação	Limpeza
		2 pontos	Lubrificação
	Correias	11 correias	Verificação desgaste/corrosão/danos
Estator	4 pontos	Lubrificação	
<b>Transportador vibratório 1 – descarga granulador</b>	Proteções (forros)	-	Verificação desgaste/corrosão/danos
<b>Filtro poeiras finas</b>	Válvula condensado	-	Verificação (limpeza se necessário)
<b>Overband</b>	Chumaceira	4 pontos	Lubrificação
	Roletes de transporte	-	Limpeza
	Tela	-	Limpeza Verificação tensão
<b>Transportador vibratório 3 – para tambor magnético</b>	Motores 1 e 2	Parafusos	Aperto
		Parafusos do revestimento	Aperto
		Parafusos dos elementos tensores	Aperto
<b>Corrente Foucault</b>	Chumaceiras do lado esquerdo e direito	6 pontos	Lubrificação
<b>Ventiladores axiais do pré-arrefecimento G0.3</b>	Motores 0.3	Coberturas	Verificação desgaste/corrosão/danos
		-	Verificação (limpeza de necessário)
		-	Verificação funcionamento

Sobre pressor de deslocamento positivo	Motor de baixa voltagem para zonas perigosas	Vedantes	Verificação (substituição se necessário)
		-	Verificação funcionamento
		4 pontos	Lubrificação
Zona pré-condensação	Condensador W0.1	-	Verificação funcionamento
	Condensador W0.2	-	Verificação funcionamento
Filtro exterior	Manómetro	-	Verificação
Filtro PU	Válvula de condensado	-	Verificação (limpeza de necessário)
Ventilador filtro exterior	Geral	-	Verificação funcionamento
Peletizadora	Camara de entrada	-	Limpeza
	Dispositivo de segurança da camara	Parafuso	Lubrificação
	Mangueiras	-	Verificação (remoção de material se necessário)
Válvula rotativa silo PU	Válvula	-	Verificação fuga
Válvulas de entrada de azoto (S.I.)	Geral	-	Verificação
			Verificação funcionamento

Outras operações de manutenção realizadas:

**Tabela A. 5 – Outras operações de manutenção preventiva aplicadas pela empresa de acordo com a sua periodicidade**

	Descrição operação	Periodicidade
1	Lavagem W0,1	6 meses
2	Lavagem W0,2	6 meses
3	Purga Tanque condensados B1 (W0,1)	6 meses
4	Purga Tanque condensado B2 (W0,1+W0,2)	6 meses
5	Limpeza filtro cónico	Mensal
6	Lavagem W1	6 meses
7	Lavagem W3	6 meses
8	Lavagem LIS	6 meses
9	Limpeza tubagens saída peletizadora	3 meses
10	Substituição filtro armário analisador de gases	Anual
11	Limpeza do condensador da peletizadora	6 meses
12	Substituição de mangas poeiras finas	Anual
13	Limpeza tubos aerotérmicos W0,0	Mensal
14	Limpeza tubos aerotérmicos W0,3	Mensal
15	Substituição de lâminas fixas granulador	4000 frigoríficos
16	Substituição de lâminas móveis granulador	4000 frigoríficos
17	Limpeza da tubagem de retorno de gás bruto	6 meses
18	Limpeza do purgador do W0,1	Dependente de (3)
19	Limpeza tubos entrada gás limpo e azoto (zona inferior granulador)	Anual
20	Substituição borracha vedante granulador/vibrador	Anual
21	Sistema refrigeração/ventilação armário E1	3/6 meses
22	Substituição de trituradores (Schredder's)	80.000 frigoríficos