

**Contribuições para a implementação de uma metodologia
RAM numa infraestrutura do grupo AdP**

João Pedro Rodrigues Areia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Eng. Nuno Rafael da Conceição Brôco

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Orientador: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Vogal: Prof. Eduardo Joaquim Anjos de Matos Almas

Novembro 2018

“Escolhe um trabalho de que gostes e não terás de trabalhar nem um dia da tua vida”

Confúcio

Resumo

Uma boa estratégia na Gestão dos Ativos reveste-se de elevada importância por ser indispensável garantir a vida útil e a disponibilidade dos equipamentos e infraestruturas a gerir. Assim, é necessário valorizar a questão da manutenção ser uma das áreas com elevado destaque na estratégia de competitividade de uma empresa, uma vez que as ações realizadas têm implicações diretas nos custos e na qualidade dos serviços prestados. De facto, uma boa gestão dos ativos físicos só será possível mediante uma gestão de manutenção ativa e persistente, mas cuidada e ponderada, de modo a garantir a disponibilidade e rapidez de resposta dos meios necessários às operações de manutenção garantindo uma gestão de custos adequada.

No âmbito de gestão da manutenção, a presente dissertação pretende promover uma melhoria na gestão das ações de manutenção corretiva nos equipamentos presentes em infraestruturas do Grupo Águas de Portugal. Pela importância que estes equipamentos têm para a atividade operacional das infraestruturas, e como resposta aos avultados investimentos feitos na fase de aquisição é de todo o interesse garantir a melhor disponibilidade possível de forma a assegurar a operacionalidade das infraestruturas bem como uma otimização dos investimentos, questão cada vez mais premente.

A presente dissertação vai incidir na definição de soluções que permitam uma melhor monitorização e análise do desempenho da manutenção corretiva nos equipamentos em infraestruturas do tipo Estações Elevatórias no Grupo Águas de Portugal, nomeadamente no desenvolvimento de metodologias para o cálculo da disponibilidade e fiabilidade como medidas do seu desempenho operacional.

No caso de estudo preconizado é desenvolvida uma metodologia de classificação de criticidade de falha de equipamentos, tendo em conta fatores como a frequência e a severidade que irá permitir uma análise crítica às falhas dos ativos e respetiva priorização. Criou-se ainda um modelo através de um diagrama de blocos, onde foi possível obter a disponibilidade e a fiabilidade da infraestrutura. Finalmente serão propostas medidas de ações corretivas para atuação na restituição da fiabilidade e disponibilidade da infraestrutura e equipamentos.

Palavras Chave: Manutenção, Gestão dos Ativos, Disponibilidade, Fiabilidade, Criticidade de Falha, Severidade, Frequência

Abstract

A good strategy in Asset Management has a big importance because it is indispensable to guarantee the useful life and the availability of the equipment and infrastructures to be managed. Thus, it is necessary to value the question of maintenance being one of the areas with high importance in the strategy of competitiveness of a company, since the actions carried out have direct impact on costs and quality of the services provided. In fact, good management of physical assets will only be possible through active and persistent but careful and thoughtful maintenance management, to ensure the availability and speed of response of the necessary means to the maintenance operations, ensuring an adequate cost management.

In the scope of maintenance management, this dissertation intends to promote an improvement in the management of corrective maintenance actions in the equipment present on Grupo Águas de Portugal infrastructures. Due to the importance that these equipments have for the operational activity of the infrastructures, and in response to the large investments made in the acquisition phase, it is in the best interest to guarantee the best possible availability in order to ensure the operability of the infrastructures as well as an optimization of the investments, question increasingly pressing.

This dissertation focusses on the definition of solutions that allow a better monitoring and analysis of corrective maintenance performance in the equipment of infrastructures type lift stations at Grupo Águas de Portugal, namely in the development of methodologies for the calculus of the availability and reliability as measures of its operational performance.

In the case study performed a methodology of equipment's failure criticality classification is developed, taking account on factors such as the frequency and severity that will allow a critical analysis to assets failure and respective prioritization. A model was also created through a block diagram, where it was possible to obtain the availability and reliability of the infrastructure. Finally, corrective actions will be proposed to act on infrastructure and equipment's reliability and availability restitution.

Keywords: Maintenance, Physical Assets Management, Availability, Reliability, Failure Criticality, Severity, Frequency

Agradecimentos

Aos meus pais e padrinhos por todo o incentivo demonstrado ao longo do meu percurso académico cujo apoio financeiro e emocional me permitiu estar hoje onde estou. A toda a educação providenciada que permitiu construir “o homem”.

Ao David Martins o apoio incondicional, conselhos e presença naquele que foi um momento perturbador da minha vida e sobretudo pelas sextas-feiras nas quais pude privar quer da sua companhia quer de todo um *staff* daquele que é “um clube tão grande como os maiores da Europa” enquanto tínhamos as nossas sessões de futsal.

À professora Virgínia Infante, por toda a disponibilidade e orientação demonstradas.

À empresa Águas de Portugal pela oportunidade recebida bem como a disponibilidade e comodidade apresentada nas suas instalações.

Ao engenheiro Rodrigo Marques pela abertura oferecida ao longo de todo o estágio e pelos momentos de descontração proporcionados.

Ao António Casanova Pinto com quem tive a honra de partilhar este estágio e todo o meu percurso académico. A sua boa disposição e companheirismo jamais serão esquecidos. Às tardes passadas na sua companhia a desenvolver projetos de mestrado, às idas ao ginásio e ao ultrapassar de todas as dificuldades que por serem de tal maneira semelhantes cimentaram uma amizade e uma união que levarei comigo para todo o sempre.

Ao Sebastião Peixoto pelos churrascos noturnos, pelos memoráveis 23 anos, pelo primeiro banho da época balnear no dia anterior à bênção de finalistas, pela grande receção em sua casa e esperemos pela aventura que nos espera lá fora.

A todos os meus restantes amigos, mas não menos importantes, que de alguma maneira partilharam da minha vida académica e que me influenciaram, mas que também foram influenciados pelo meu estado de espírito. Aos amigos de infância que apesar do pouco contacto tiveram o seu papel.

À Leslie, pelos momentos passados que dificilmente algum dia serão esquecidos, mas, sobretudo pela aprendizagem que possibilitou bem como todos os acontecimentos subsequentes daquele que foi um dos dias mais negros até então.

À Mélanie Mendes por toda a amizade de longa data, por “engolir” certas atitudes e determinados comportamentos temperamentais, mas sobretudo pela gambiarra.

Índice

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	x
Lista de Acrónimos e Símbolos	xi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Metodologia	3
1.5. Estrutura da Dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Gestão de Ativos	4
2.1.1. Definição e Conceito.....	4
2.1.2. Ciclo de vida de um ativo.....	4
2.1.3. Relação Gestão de Ativos e Manutenção.....	5
2.2. Fiabilidade	6
2.2.1. Funções de Fiabilidade.....	7
2.2.2. Densidade de Probabilidade de falha, Taxa de Avarias e Função de Fiabilidade Geral	8
2.2.3. Paradigma Tempo médio de falhas (MTTF) e Tempo médio entre falhas (MTBF)	9
2.2.4. Curvas de Mortalidade.....	10
2.2.5. Distribuições de Fiabilidade	11
2.2.5.1. Distribuição Exponencial Negativa.	11
2.2.5.2. Distribuição de Weibull	12
2.3. Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade	13
2.3.1. Manutibilidade	13
2.3.2. Disponibilidade	14
2.4. Metodologia RAM	16
2.4.1. Métodos e Ferramentas da metodologia RAM	16
2.4.1.1. Análise Funcional	17
2.4.1.2. FMECA	17
2.4.1.3. Árvore de Falha	18
2.4.1.4. Diagrama de Blocos Funcionais	19

2.4.1.5.	Sistema Série	19
2.4.1.6.	Sistema Paralelo	20
2.4.1.7.	Sistema <i>Stand-by</i>	21
3.	Apresentação Grupo Águas de Portugal	23
3.1.	Entidades Reguladoras e Regulação Operacional	24
3.2.	Ciclo Urbano da Água e Interligação com Áreas de Negócio	26
3.2.1.	Estação Tratamento de Águas	27
3.2.2.	Estação de Tratamento de Águas Residuais.....	28
3.2.3.	Estações Elevatórias	30
3.3.	Estruturação do processo de Manutenção.....	31
3.3.1.	Localizações Operacionais.....	32
3.3.2.	Pedidos e Ordens de Trabalho.....	35
4.	Análise exploratória dos dados de manutenção	37
4.1.	Informação fornecida.....	37
4.2.	Tratamento e Apresentação do Diagnóstico	38
4.3.	Análise de dados da Estação Elevatória Jamor.....	43
4.4.	Problema a Analisar	45
5.	Caso de estudo - Projeto Piloto.....	46
5.1.	Estação Elevatória Jamor.....	46
5.2.	Análise Funcional	49
5.3.	Análise FMECA	53
5.4.	Análise de Árvore de Falha	55
5.4.1.	Descarga	56
5.4.2.	Inundações e poço de bombagem recebe gradados.....	58
5.5.	Matriz de Criticidade.....	59
5.5.1.	Definição de Escala de Frequência	59
5.5.2.	Definição da Escala de Severidade.....	60
5.5.3.	Cálculo da criticidade.....	62
5.6.	Diagrama de Blocos da Estrutura	64
5.7.	Fiabilidade e Disponibilidade.....	67
5.8.	Sistema de aquisição de dados	70
5.9.	Proposta de Mitigação de Falhas e Output de Resultados.....	70
5.10.	Etapas, cuidados e implementação da metodologia.....	74
5.11.	Pressupostos para implementação da metodologia	75

6. Conclusões e Trabalhos futuros	77
6.1. Conclusões e limitações do método.....	77
6.2. Trabalhos Futuros.....	79
Referências Bibliográficas	80
Anexos	83
Anexo A – Distribuição Geográfica empresas Grupo Águas de Portugal	83
Anexo B – Esquema do processo de manutenção	84
Anexo C – Campos disponibilizados em ambiente Excel	85
Anexo D – Esquema da Planta da Estação Elevatória do Jamor	87
Anexo E – Análise Funcional Estação Elevatória do Jamor	88
Anexo F – Diagrama de Árvore de Falha	89
Anexo G – Tabela de componentes escala de Severidade de falha.....	90
Anexo H – Tabela de componentes com escalas de Severidade e Frequência de falha.....	91
Anexo I – Tabela de Indicadores de fiabilidade e tempo de funcionamento de equipamentos	92

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo de Vida de um Ativo, [3]	5
Figura 2 - Articulação entre custos, riscos e esforço da Gestão de Ativos, [3]	6
Figura 3 - Ponto de Equilíbrio entre Falhas e Fiabilidade, [4]	6
Figura 4 - Curva da banheira - taxa de avarias, [8].....	10
Figura 5 - Curvas de Mortalidade, [6].....	10
Figura 6 - Distribuição Exponencial Negativa: gráficos de fiabilidade, função densidade de probabilidade de falha e taxa de avarias, [7]	11
Figura 7 - Tempo médio de operacionalidade e tempo médio de inoperacionalidade, [8].....	14
Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema série de n componentes, [12].....	19
Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema paralelo de n componentes, [12].....	20
Figura 10 - Diagrama de blocos sistema stand-by, [12].....	22
Figura 11 - Funcionamento de unidade principal, sensor comutador e unidade stand-by para missão com duração t.....	22
Figura 12 - Empresas do Grupo AdP resultantes dos processos de reestruturações internas, adaptado de [14,15 e 16].....	23
Figura 13 - Eixos Estratégicos e Objetivos Operacionais do programa PENSAAR 2020, [22]	25
Figura 14 - Área De Negócio Abastecimento – Sistemas em Alta e Baixa, adaptado de [24].....	26
Figura 15 - Área de Negócio Saneamento - Sistemas em Alta e Baixa, adaptado de [25]	26
Figura 16 - Esquema de Funcionamento de uma ETA, [26]	27
Figura 17 - Esquema de Funcionamento de uma ETAR, [27]	28
Figura 18 - Software comercial em Gestão de Ativos, adaptado de [29].....	31
Figura 19 - Localizações Operacionais em SAP-AA e SMGA, [29]	32
Figura 20 - Código de Localização tipo disponibilizado nas OT e respetivos níveis	32
Figura 21 - Árvore de Localizações Aquaman, fornecido por Aquasis	33
Figura 22 - Família de Infraestruturas para Sistema de Abastecimento em Alta, [29].....	33
Figura 23 - Família de Infraestruturas para Sistema de Saneamento em Alta, [29].....	33
Figura 24 - Famílias de Infraestruturas e Atividades - Produção e Transporte (Alta), [29].....	34
Figura 25 - Famílias de Infraestruturas e Atividades - Tratamento e Destino Final (Alta), [29]	34
Figura 26 - Sala de controlo genérica do SCADA, [30].....	35

Figura 27 - Etapas processo manutenção	35
Figura 28 – Distribuição de OT por Áreas de Negócio.....	39
Figura 29 - Distribuição de OT por tipologia de Infraestrutura	40
Figura 30 - Distribuição de OT por tipologia Estação Elevatória	40
Figura 31 - Distribuição Localizações Operacionais no preenchimento de OT	41
Figura 32 - Distribuição do Intervalo de Tempo de Reparação de Falhas em Meses	42
Figura 33 - Distribuição Tempo médio de Reparação de Falhas em horas	42
Figura 34 - Distribuição OT por classes de equipamento	43
Figura 35 - Sistema de Saneamento da Costa do Estoril	46
Figura 36 - Pormenor Grelha do tamisador.....	47
Figura 37 - Tamisador.....	47
Figura 38 - Etapa de classificador de Areias e recirculação nos tamisadores.....	48
Figura 39 - Bombas Estação Elevatória	48
Figura 40 - Diagrama de Ishikawa modos de falha.....	53
Figura 41 - Válvula mural de entrada com principais pontos de intervenção de manutenção	57
Figura 42 - Matriz de criticidade de falhas dos equipamentos.....	64
Figura 43 - Diagrama de blocos do sistema.....	65
Figura 44 - Subsistema comportas entrada	65
Figura 45 - Subsistema Linhas Pré-Tratamento	65
Figura 46 - Subsistema Bombagem	66
Figura 47 - Subsistema Energia Pneumática.....	66
Figura 48 - Subsistema Energia Elétrica.....	66
Figura 49 - Evolução da fiabilidade probabilidade de falha ao longo do tempo de funcionamento da instalação.....	67
Figura 50 - SCADA Genérico	70
Figura 51 - Evolução da Fiabilidade com $MP=0.75MTBF$	71
Figura 52 - Evolução da Fiabilidade com $MP=0.8MTBF$	71
Figura 53 - Evolução da Fiabilidade com $MP=0.85MTBF$	71
Figura 54 - Tempo de funcionamento para equipamentos sujeitos a diferentes intervalos de tempos de intervenção	72
Figura 55 – $MP \text{ etapa} = \text{Min}\{0.85MTBF\}$ equipamentos	72

Figura 56 - Fiabilidade com MP = 6 anos.....	73
Figura 57 - Ações de Mitigação de falha típicas em cada uma das fases do projeto, [33].....	74
Figura 58 - Fluxograma etapas metodologia.....	74

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Relação entre Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade, [11]	15
Tabela 2 - Portas Lógicas Árvore de Falha, adaptado de [4]	18
Tabela 3 - Quadro de estados de um sistema de 3 componentes, [4].....	21
Tabela 4 - Inventário Infraestruturas Grupo AdP	24
Tabela 5 - Distribuição de OT fornecidas	37
Tabela 6 - Escala de Frequência matriz criticidade.....	59
Tabela 7 - Escala de Tempo de Reparação	60
Tabela 8 - Escala de Custo de Reparação.....	61
Tabela 9 - Escala de Criticidade de Localização do equipamento na função principal	61
Tabela 10 - Escala de Criticidade	63
Tabela 11 - Taxa de Avarias para Infraestrutura	68
Tabela 12 - Disponibilidade da Infraestrutura.....	69
Tabela 13 - Intervalos de MP de etapas	72

Lista de Acrónimos e Símbolos

AdP	Águas de Portugal
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Águas
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
HazOp	<i>Hazard and Operability study</i> , Estudo de perigo e operabilidade
MDT	<i>Mean Down Time</i> , Tempo médio de inactividade
MP	Manutenção Preventiva
MUT	<i>Mean Up Time</i> , Tempo médio de actividade
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> , Tempo médio entre falhas
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> , Tempo médio para a falha
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i> , Tempo médio de manutenção
OT	Ordens de Trabalho
PT	Pedido de Trabalho
RAM	<i>Reliability Availability Maintenance</i> , Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenção
RAMS	<i>Reliability Availability Maintenance Safety</i> , Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenção, Segurança
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> , Fiabilidade centrada na Manutenção
SAP	Sistemas, Aplicações e Produtos
SAP-AA	Sistemas, Aplicações e Produtos para contabilidade de ativos
SAP-PM	Sistemas, Aplicações e Produtos para Manutenção Preventiva
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> , Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SIA	Sistema de Inventariação de Ativos
SMGA	Sistema de Manutenção e Gestão de Ativos

1. Introdução

No âmbito da unidade curricular de Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, tendo como objetivo a apresentação de um trabalho efetuado em parceria, sob a forma de estágio curricular, com o grupo Águas de Portugal no decorrer do presente semestre do ano letivo 2017/2018, desenvolveu-se o presente documento.

1.1. Enquadramento

O sector do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais é um sector de capital intensivo, ou seja, os investimentos são contínuos e não se esgotam no período inicial de execução de novas infraestruturas, situação que leva a necessidades permanentes de recursos financeiros.

Por outro lado, o consumidor final evoluiu para um cliente consciente não só da importância da existência de um serviço, mas de um serviço sustentável, atento à qualidade do produto que lhe é fornecido, como também da resiliência da entidade que presta esses serviços.

O setor caracteriza-se igualmente pela existência de “custos afundados” no sentido em que a realização de investimentos em infraestruturas são decisões irreversíveis. Estas características, por si só, levam a que as entidades gestoras destes serviços devam concentrar esforços na adoção de boas práticas que permitam executar investimentos virtuosos e sustentáveis, para assegurar um bom desempenho dos sistemas infraestruturais, ao mais baixo custo, com riscos controlados com vista a se atingirem os níveis de qualidade de serviço exigidos.

Pelo exposto, é condição necessária a adoção, pelas entidades gestoras, de políticas e práticas adequadas de manutenção e gestão de ativos, de modo a tornar mais assertiva e justificada a tomada de decisão sobre os orçamentos e planos de investimento e a gerir os ativos infraestruturais de modo mais eficiente e sustentável

A gestão dos Ativos físicos apresenta-se como um fator preponderante para a competitividade de uma empresa, uma vez que as ações neste nível têm repercussões nos custos produtivos bem como na qualidade dos produtos produzidos ou dos serviços prestados. Deste modo, torna-se importante não só ser tecnicamente eficaz (alcançar os objetivos operacionais), mas também atingir uma eficiência operacional superior ao alcançar esses mesmos objetivos com o consumo mínimo de recursos quer materiais quer humanos.

Por toda essa panorâmica, a manutenção não deve ser dissociada, mas sim integrada, com a operação no processo de gestão de uma empresa. Apenas com o funcionamento conjunto destas duas vertentes se alcança uma qualidade e segurança do serviço prestado de nível superior ao proporcionar o correto funcionamento de equipamentos e sistemas durante o maior tempo possível.

1.2. Motivação

A presente dissertação pretende contribuir para uma melhoria da manutenção corretiva, no âmbito da gestão da manutenção no Grupo AdP, doravante denominado Grupo AdP. As empresas constituintes do Grupo AdP, centram a sua atividade no projeto, conservação e exploração de infraestruturas inseridas em todo o ciclo urbano da água, desde a sua captação, tratamento, distribuição e libertação ao meio recetor.

O presente trabalho incide na análise da gestão da manutenção corretiva dos equipamentos e infraestruturas do grupo, assumindo estes, especial relevância na medida em que constituem a principal fonte de rendimento económico para as empresas, razão pela qual é de todo o interesse a maximização do nível de disponibilidade como resposta aos avultados investimentos feitos na sua aquisição.

Por esta razão, é finalidade desta dissertação criar metodologias e ferramentas para assegurar um dos principais objetivos do Grupo AdP, que é a garantia de um elevado nível de disponibilidade dos equipamentos, culminando num bom funcionamento dos serviços prestados, equilíbrio das tarifas bem como na passagem de uma imagem refletora de uma operacionalidade eficiente.

Naturalmente que tais proposições apenas poderão ser cumpridas se os ativos do grupo forem sujeitos a uma manutenção eficiente ao nível operacional (demonstrando prontidão na resposta à falha) e existir capacidade de monitorizar tanto o estado dos equipamentos como a execução de ações corretivas bem como antever medidas que permitam prever a falha, sendo este, o foco desta dissertação.

1.3. Objetivos

É objetivo desta dissertação contribuir para a definição de uma metodologia e soluções que garantam uma eficiente gestão dos equipamentos por forma a assegurar o melhor compromisso entre operacionalidade da rede de manutenção e disponibilidade dos equipamentos. Com este trabalho pretende-se:

- Análise ao estado da manutenção de equipamentos das infraestruturas do Grupo AdP e contextualização, com histórico de manutenção adquirido.
- Desenvolvimento de uma classificação de criticidade de falha de equipamentos tendo em conta aspetos como a frequência de a severidade (contabilizando aspetos funcionais, monetários e operacionais).
- Criação de um sistema de blocos funcionais que permita uma análise de fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos com vista à identificação de necessidades de substituição.
- Desenvolvimento de uma metodologia que para um nível de fiabilidade pré-estipulado, permita o desenvolvimento de propostas para mitigação de falhas focadas na restituição da fiabilidade da infraestrutura ou dos equipamentos.

1.4. Metodologia

O trabalho desenvolvido nesta dissertação, assentou em três fases distintas:

Procedeu-se à contextualização da realidade do Grupo AdP. Durante os primeiros 15 dias foram recolhidas todas as informações necessárias à análise da manutenção que se pretendia fazer, tendo os 3 meses seguintes, sido ocupados com a análise e estruturação da informação recebida bem como a sua normalização para efeitos de análise. Adicionalmente, neste período, foi ainda possível visitar duas tipologias de infraestruturas: Estação de Tratamento de Águas Residuais e Estação Elevatória. Foi recolhida informação com apoio das equipas de manutenção do grupo AdP, e de empresas representantes de grupo eletrobomba. Ainda durante este período foi possível identificar os pontos essenciais a abordar, bem como objetivos a atingir no caso de estudo.

Numa segunda fase, desenvolveu-se a revisão bibliográfica como suporte teórico ao desenvolvimento de soluções com vista à resolução dos problemas identificados.

Por fim, nos últimos dois meses, desenvolveram-se metodologias que permitissem não só colmatar as falhas evidenciadas ao longo de todo o processo de manutenção corretiva, mas também a criação de um ponto de partida de monitorização do estado fiabilístico de uma dada infraestrutura, agindo, sob a forma de ações de mitigação de falha, face à resposta dada pelo modelo.

1.5. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação conta com 6 capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, é enquadrada a necessidade da presente dissertação sobre a manutenção corretiva no Grupo AdP.

O segundo capítulo constitui uma revisão bibliográfica onde são apresentados os conceitos de Gestão de Ativos, Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade, bem como se procede à relação entre estes três últimos. É ainda apresentada uma definição de todo o processo *RAM – Reliability Availability and Maintenance* necessário ao desenvolvimento do estudo proposto.

O terceiro capítulo pretende apresentar o Grupo AdP, identificando as principais áreas de negócio bem como tipologias de infraestruturas associadas a cada uma. É ainda feita uma apresentação do processo de manutenção atualmente em vigor no Grupo.

O quarto capítulo constitui o diagnóstico desenvolvido tomando em consideração os dados fornecidos, constituindo a base de partida para o estudo efetuado.

No quinto capítulo é descrito o estudo proposto, através da implementação de um projeto piloto que permitiu o rastreio de indicadores de fiabilidade de uma Estação Elevatória, sendo estes apresentados graficamente. Por fim, é feita uma abordagem à mitigação de falhas e finalmente apresentado um fluxograma com as etapas necessárias à implementação da metodologia.

No sexto e último capítulo são apresentadas conclusões e propostas para trabalhos futuros para seguimento e implementação da presente dissertação.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica essencial à contextualização das ferramentas utilizadas na estrutura da dissertação bem como em possíveis trabalhos futuros. Nomeadamente definem-se conceitos como Gestão de Ativos, Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade e finalmente é apresentada toda a metodologia RAM bem como cada uma das suas subetapas.

2.1. Gestão de Ativos

2.1.1. Definição e Conceito

Um ativo define-se como “*um bem, uma coisa ou uma entidade, que tem um valor potencial ou real para uma organização*”, podendo este valor, para a mesma organização, mudar ao longo da vida do ativo [1].

A Gestão de Ativos é um conceito cuja designação varia muito, assumindo internacionalmente nomes como: *Asset Management, Total Asset Management, Comprehensive Asset Management, Strategic Asset Management, Strategic Infrastructure Management*, com outras tantas siglas

De entre várias definições, a que mais se adequa na presente dissertação será “*processo integrado de tomada de decisão, planeamento e controlo quanto à aquisição, uso, proteção e eliminação de ativos, com vista a maximizar o seu potencial de resposta em serviço e benefícios e a minimizar os riscos que lhe estão associados e os seus custos ao longo do seu ciclo de vida*” [2].

A Gestão de Ativos é, assim, uma filosofia de gestão que reflete uma estratégia de operação, manutenção, reabilitação e substituição de ativos da empresa, baseada em níveis de serviço e económicos previamente definidos.

2.1.2. Ciclo de vida de um ativo

O ciclo de vida de um ativo pode ser dividido em quatro fases principais articuladas ciclicamente entre si (figura 1):

- **Fase de planeamento** – onde é feito o planeamento e conceção dos ativos. Nesta etapa é criado o plano de gestão de ativos e definição dos requisitos e políticas de desempenho e manutenção de ativos.
- **Fase de construção** – onde são construídos ou adquiridos os ativos. Através do acompanhamento das obras e do controlo de qualidade é certificado que os ativos cumprem os requisitos definidos na fase anterior.
- **Fase de vida útil** – corresponde ao período de vida útil onde os ativos são operados e mantidos. É objetivo desta fase assegurar a operacionalidade de forma a dar uma resposta eficaz às funções a que o ativo se destina.

- **Fase de desativação** – após atingir a vida útil, o ativo será desativado, substituído, desmantelado ou alocado a outro fim, tendo qualquer destas opções custos e consequências variadas e complexas que devem ser seriamente ponderadas.

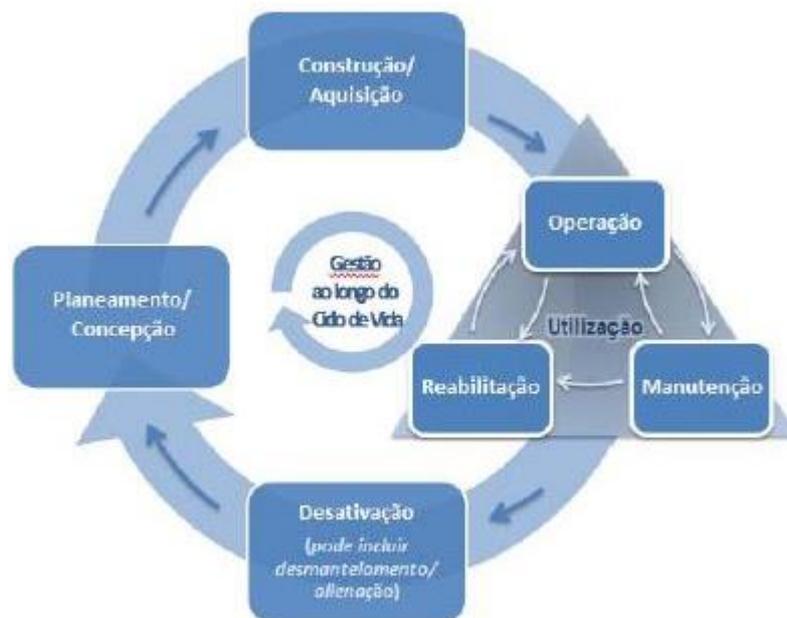


Figura 1 - Ciclo de Vida de um Ativo, [3]

2.1.3. Relação Gestão de Ativos e Manutenção

A Gestão de Ativos baseia-se em níveis de serviço e económicos, previamente definidos e espelha-os numa filosofia de gestão que se traduz numa estratégia de operação, manutenção, reabilitação e substituição de ativos [3]. Assim, deverá entender-se a manutenção como uma das componentes de uma estratégia global de gestão de ativos e que é responsável pela manutenção do estado de condição de um ativo dentro de valores ideais no rácio *performance* - custo.

O esforço na gestão de ativos reflete a preocupação que a empresa tem para com o bom funcionamento dos equipamentos e traduz os esforços feitos em termos de manutenção relacionando-se com os custos associados à manutenção (custos de material e alocação de recursos humanos) de forma inversamente proporcional. De facto, ao longo do ciclo de vida de um ativo é possível destacar três momentos distintos respeitantes à sua substituição (figura 2):

- **Substituição precoce do ativo** – onde se minimiza o risco associado ao ativo e se destaca uma despreocupação com a sua manutenção evidenciando um reduzido esforço de gestão
- **Substituição tardia do ativo** – em oposição à situação anterior, o ativo é substituído demasiado tarde, alocando um maior risco de falha para o equipamento e evidenciando um aumento de manutenção corretiva (o esforço de gestão é maior do que na situação anterior, no entanto, é desperdiçado a resolver problemas que não foram antecipados).

- **Substituição ótima do ativo** – zona onde se destaca o máximo de esforço de gestão, otimização dos custos totais do equipamento (que inclui os custos de manutenção e operação) consequentes de um maior nível de operacionalidade.

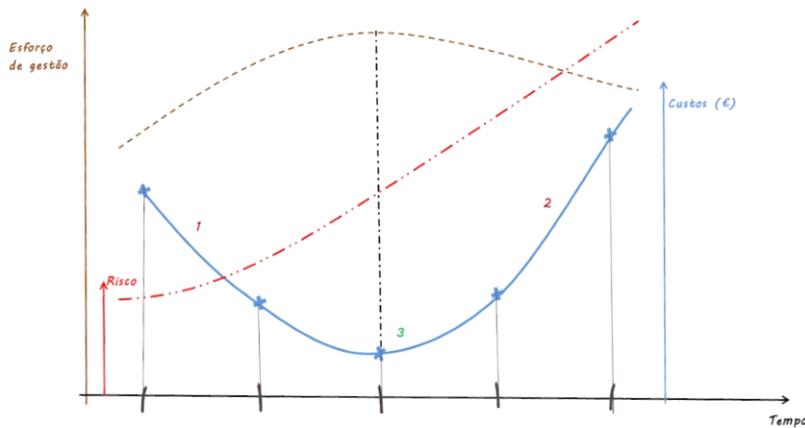


Figura 2 - Articulação entre custos, riscos e esforço da Gestão de Ativos, [3]

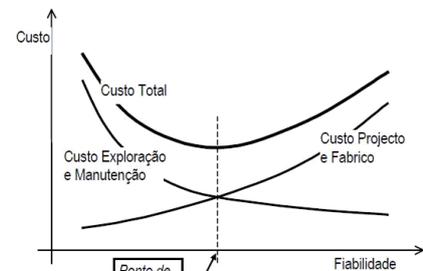


Figura 3 - Ponto de Equilíbrio entre Falhas e Fiabilidade, [4]

Verifica-se então que a gestão de ativos se traduz num exercício de otimização contínuo, focado na minimização dos custos em todo o ciclo de vida dos ativos sendo apenas atingível por aproximações sucessivas.

Enquanto que na figura 2 se relaciona o custo com o esforço de manutenção e o risco associado ao funcionamento do ativo, ou seja, vertentes mais operacionais, a figura 3 demonstra que a mesma linha de pensamento poderá ser aplicada não só à vertente operacional, mas também é fase de conceção de projeto e de fabrico. Por toda esta versatilidade, é de todo o interesse encontrar o melhor compromisso possível entre a fiabilidade e o custo resultante da existência de falhas.

2.2. Fiabilidade

O conceito de fiabilidade apresenta um leque de definições pela literatura sendo o denominador comum o “operar, sem falhas”. Cada sistema produtivo pode ter uma noção diferente e ajustável de fiabilidade destacando-se assim a maleabilidade que este conceito possui na indústria.

A norma NP EN 13306 define fiabilidade como “a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo” [5], trata-se, portanto, de uma medida de desempenho de um sistema que convém distinguir do termo confiança. Fiabilidade é um conceito técnico localizado dentro de um conceito mais abrangente, confiança, ou seja, a falibilidade pode-se dizer ser um caso particular e específico do termo confiança. Enquanto que um sistema se diz confiável se, genericamente, for cumpridor da sua função (admitindo alguma descontinuidade), o termo fiável refere-se a um sistema que cumpre a sua função ao longo do tempo (continuidade) [4].

A falha de um componente denota cessação de funcionamento do mesmo (sendo considerada uma falha catastrófica), podendo, também, mais frequentemente, designar a degradação de um dos parâmetros de desempenho até um nível considerado insatisfatório (dizendo-se que o

componente trabalha em condição deficiente). Enquanto que a falha catastrófica se traduz pela variação súbita e imediata das características de um dado componente levando à sua inoperabilidade, a falha por degradação, denota a alteração progressiva das características do componente, até um estado em que a qualidade do cumprimento da função se altere [4].

Segundo a norma acima mencionada é definida avaria, ou falha como a “cessação de um bem para cumprir uma função requerida”, traduzindo-se num acontecimento, enquanto que o termo avariado se refere a um estado operacional [5]. Apesar de não haver uma distinção literária entre os dois termos, na realidade, o termo avaria é alocado ao equipamento, enquanto que o termo falha, se refere, aos componentes desse mesmo equipamento.

Considerando a natureza aleatória da falha, a fiabilidade (designada por $R(t)$ da literatura anglo-saxónica *reliability*) permite quantificar o êxito no desempenho de uma determinada função como uma probabilidade de sucesso, complementar da probabilidade de falha (designada por $F(t)$ da literatura anglo-saxónica *failure*). Assim, pode-se afirmar que o sucesso e falha operacional são mutuamente exclusivos, verificando a equação 2.1:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2.1)$$

A fiabilidade, tratando-se de uma probabilidade, traduz uma estimativa da confiança que um dado sistema oferece em termos da sua funcionalidade sendo esta tão mais aproximada da realidade quanto maior for a dimensão da amostra da experiência operacional. Por esta mesma razão, a fiabilidade é tomada como uma previsão nunca devendo ser confundida com “uma indicação determinística do acontecimento”. A informação desta estimativa provem essencialmente de duas fontes [4]:

- **Fabricantes** – através de ensaios de fiabilidade com critérios controlados. Diz-se, portanto, ser uma **fiabilidade intrínseca**, apenas aumentada por melhorias ao nível de projeto.
- **Utilizadores** – através da experiência real, de serviço, ou, em alternativa, através do fornecimento de dados ao fabricante que será responsável pelo tratamento e extração de resultados operacionais. Diz-se, portanto, ser uma **fiabilidade extrínseca**, traduzindo uma maior confiança fiabilística dado o maior tamanho da experiência operacional.

Verifica-se que dadas as condições reais de serviço serem, por norma, mais severas que as condições de ensaio, o valor da fiabilidade intrínseca ser superior ao da fiabilidade extrínseca.

2.2.1. Funções de Fiabilidade

Como referido anteriormente, a fiabilidade traduz uma probabilidade de um componente cumprir a sua função sobre determinadas condições de serviço verificadas num certo intervalo de tempo, como tal, o seu cálculo apresenta um carácter quantitativo sendo definido como a probabilidade de sobrevivência para uma dada missão com duração $t = t$, posto em serviço no instante inicial, $t = 0$, sob a condição de novo, traduzindo-se na seguinte expressão [4]:

$$R(t) = P\{T_F > t\} \quad (2.2)$$

Onde T_F representa a idade de falha, ou seja, o tempo acumulado em serviço pelo componente até ao aparecimento da primeira falha, logo $R(t)$ medirá a probabilidade de ocorrer falha para um tempo t posterior ao considerado em estudo, sendo uma função contínua em t decrescente a partir de $t = 0$. Admite-se ainda como postulados que a fiabilidade é máxima no instante inicial, ou seja, ao instalar o equipamento, este não se encontra previamente avariado, naturalmente, tendo-se $R(0) = 1$ e que todos os equipamentos tem uma vida limitada, não podendo operar indefinidamente, $R(\infty) = 0$.

Caso a missão tenha como duração um determinado intervalo de tempo, $\Delta t = t_2 - t_1$, e o componente tenha uma idade acumulada em $t_1 \neq 0$ então a fiabilidade torna-se uma probabilidade condicional [4]:

$$R(\Delta t|t_1) = P\{T_F > t_2 = t_1 + \Delta t | T_F > t_1\} \quad (2.3)$$

A expressão traduz-se na probabilidade de não se verificarem falhas no intervalo $[t_1, t_2 = t_1 + \Delta t[$, sob a condição de estar operacional no início da missão em t_1

2.2.2. Densidade de Probabilidade de falha, Taxa de Avarias e Função de Fiabilidade Geral

Considerando um ensaio fiabilístico, realizado num determinado intervalo de tempo t sob um conjunto de N componentes iguais, com igual probabilidade de falha, $F(t)$, se durante este ensaio falharem N_f componentes e conseqüentemente sobreviverem N_s ($N_s = N - N_f$) podemos estimar a probabilidade de falha e de sobrevivência, $F(t)$ e $R(t)$, respetivamente, segundo as fórmulas [4]:

$$F(t) = \frac{N_f(t)}{N} \quad (2.4)$$

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N} \quad (2.5)$$

Sendo estes dois acontecimentos, e respetivas probabilidades, complementares e mutuamente exclusivos, diferenciando a equação 2.4 em ordem a t obtém-se:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN_f(t)}{dt} = f(t) \quad (2.6)$$

Sendo $f(t)$ a função densidade de probabilidade de falha que reflete a taxa a que os componentes falham por unidade de intervalo de tempo, considerando o instante t , relativamente ao número de componentes inicial da amostra N .

Integrando a função obtida em 2.6, considerando os extremos de integração $t = 0$ e $t = t$, obtém-se a função probabilidade acumulada de falha ou simplesmente função probabilidade de falha:

$$\int_0^t f(t). dt = \int_0^t \frac{dF(t)}{dt}. dt = F(t) \quad (2.7)$$

Retomando a equação 2.1 tem-se a fiabilidade dada por:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t). dt = \int_t^{\infty} f(t). dt \quad (2.8)$$

Pois verifica-se que se estendermos o limite do nosso intervalo de integração entre $t = 0$ e $t = \infty$ obtém-se o acontecimento certo, que se traduz na falha, ou seja:

$$F(\infty) = \int_0^{\infty} f(t). dt = 1 \quad (2.9)$$

Um outro importante indicador da fiabilidade é a taxa instantânea de falhas ou taxa de avaria, $\lambda(t)$, uma função de probabilidade instantânea condicional de falha que reflete a quantidade de componentes que falham, num dado instante t , relativamente ao número de componentes sobreviventes da amostra inicial, N_s , sendo a sua fórmula definida por [4]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.10)$$

Resolvendo a equação 2.10 em ordem a $R(t)$ e integrando, considerando os extremos de integração $t = 0$ e $t = t$, obtém-se a função geral de fiabilidade [19]:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t). dt} \quad (2.10)$$

Esta função diz-se geral pelo facto de poder ser aplicável a qualquer distribuição de probabilidade de falha de qualquer período da curva de mortalidade do componente.

2.2.3. Paradigma Tempo médio de falhas (MTTF) e Tempo médio entre falhas (MTBF)

O tempo médio de falha ou *Mean Time to Failure* (MTTF) é, ainda, outro indicador de fiabilidade bastante utilizado nos cálculos fiabilísticos de um sistema sendo definido como a média dos tempos entre falhas sucessivas num dado componente. Este indicador relaciona-se diretamente com a fiabilidade da seguinte forma [4]:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (2.11)$$

O tempo médio entre falhas ou *Mean Time Between Failures* (MTBF) é outro indicador de fiabilidade que se trata de uma forma particular do MTTF, cuja fórmula de aplicação e relação com a fiabilidade é a mesma, porém convém fazer a distinção entre os indicadores [4]:

- **MTTF** – utiliza-se este indicador quando os componentes são não reparáveis, sendo substituídos por novos aquando da sua falha, razão pela qual para cada componente termos apenas um MTTF, podendo estimar-se um valor médio quando componentes iguais apresentam tempos de vida diferentes.
- **MTBF** – utiliza-se este indicador quando os componentes são reparáveis, procedendo-se à sua manutenção e posterior colocação em serviço, aquando da situação de falha.

2.2.4. Curvas de Mortalidade

As funções apresentadas e detalhadas anteriormente, nomeadamente, a função densidade de probabilidade de falha, $f(t)$, a taxa de avarias, $\lambda(t)$ (representado na figura 5 como $h(t)$), a função probabilidade acumulada de falha, $F(t)$ e a fiabilidade, $R(t)$, podem ser observadas como leis de vida dos componentes sendo representadas graficamente pelas curvas de mortalidade (figura 5) [6]. A taxa de avarias em função do tempo tem representação gráfica na chamada curva da banheira, na qual se pode observar a evolução da ocorrência de falhas ao longo da vida de um componente, resultando, assim, na identificação de três fases, ou períodos característicos: Infância ou Mortalidade Infantil, Vida útil e desgaste (figura 4) [6].

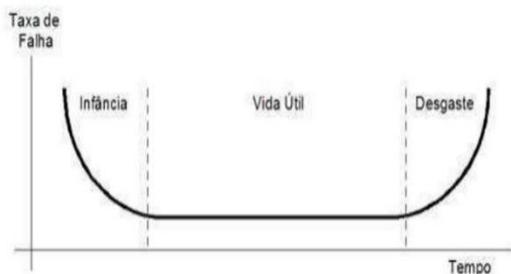


Figura 4 - Curva da banheira - taxa de avarias, [8]

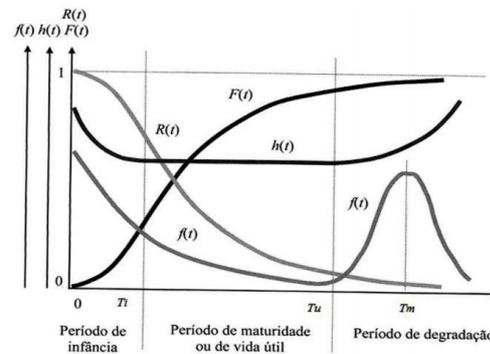


Figura 5 - Curvas de Mortalidade, [6]

A fase de vida inicial ou de mortalidade infantil caracteriza-se por apresentar uma elevada taxa de falhas que decresce com o tempo até se atingir a idade T_i sendo esta elevada taxa de avarias motivada por defeitos de fabrico, montagem, projeto ou de instalação. A redução da relevância da mortalidade infantil passa pela aplicação de políticas mais restritas relativamente à melhoria de qualidade nas fases de projeto e fabrico complementadas com a realização de ensaios prévios aquando da entrada de serviço dos componentes.

A fase de vida útil é caracterizada por uma taxa de avarias praticamente constante sendo determinada pelo surgimento de falhas aleatórias sem qualquer lógica temporal muito pouco

frequentes, mas nunca totalmente ausentes. Este período de vida termina em T_u , idade de vida nominal do componente, ocupando a maior parte da vida do componente em serviço. Dado se verificar que a taxa de avarias não apresenta uma dependência do tempo a fiabilidade toma a fórmula exponencial negativa. Dado o carácter aleatório das falhas neste período de vida não é possível eliminar-se a ocorrência de avarias por ações preventivas, mas, é sim possível a redução de $\lambda(t)$ pela incorporação de melhorias de fiabilidade ao nível de projeto e fabrico com repercussão na fase de mortalidade infantil. Uma outra possibilidade é o aumento de T_u , adiando o crescimento da taxa de avarias, por aplicações de manutenção preventiva nesta fase [4].

A fase de desgaste tem início em T_u e conta com uma subida abrupta da taxa de falhas, a partir deste instante, consequência do aparecimento de um ou vários modos de falha como a fadiga, corrosão ou desgaste, acentuadas pela longevidade do componente em serviço. Sendo de evitar a entrada nesta fase é importante que se conheça o valor da idade T_u de modo a serem definidos planos de manutenção preventiva que previnam a entrada do componente nesta fase de vida. Pela figura 5 podemos observar que após a entrada do componente nesta fase de desgaste a taxa de avarias $\lambda(t)$ cresce acentuadamente enquanto que a função densidade de probabilidade de falha $f(t)$ apresenta uma distribuição gaussiana em torno da idade média T_m , por esta razão e desprezando o número de avarias ocorrentes antes de T_u , poder-se-á afirmar que metade da amostra falhará ao atingir a idade de vida T_m pelo que a aplicação de uma distribuição normal nesta fase seria adequada e válida.

2.2.5. Distribuições de Fiabilidade

Como evidenciado pelas curvas de mortalidade é possível para cada fase de vida do componente adaptar uma distribuição estatística sendo através destas possível a realização de estudos fiabilísticos. Por esta razão far-se-á uma apresentação das distribuições estatísticas mais importantes como a distribuição exponencial negativa e a distribuição de *Weibull*.

2.2.5.1. Distribuição Exponencial Negativa.

A distribuição exponencial negativa (figura 6) pode ser aplicada quando a taxa de avarias é constante, comportamento característico da fase de vida útil. Considera-se válida a utilização desta distribuição sempre que a mortalidade infantil for praticamente inexistente ou não se verifique uma acentuada fase de desgaste durante o tempo de operação requerido para o equipamento. Apresentam-se em seguida as funções características da fase de vida útil cujas expressões são dadas por [7]:

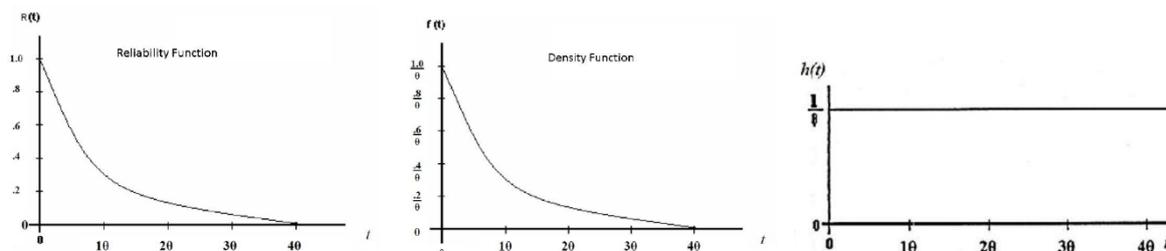


Figura 6 - Distribuição Exponencial Negativa: gráficos de fiabilidade, função densidade de probabilidade de falha e taxa de avarias, [7]

$$\begin{cases} f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ f(t) = 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2.13)$$

$$\lambda(t) = \lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{MTBF} \quad (2.14)$$

2.2.5.2. Distribuição de Weibull

Do universo das distribuições estatísticas aplicadas à fiabilidade a distribuição de Weibull destaca-se como sendo a mais utilizada em engenharia dada a sua versatilidade e melhor aproximação aos dados reais. De facto, através do ajuste dos seus parâmetros é possível manipular a forma desta distribuição de modo a que se possa ajustar a qualquer fase do ciclo de vida do componente.

Um sinal evidente desta versatilidade resume-se no facto de poder ser definida não só a partir de $t = 0$, mas também para qualquer determinado instante $t = \gamma > 0$. A outra prova do poder desta distribuição prende-se no facto de que através da variação do parâmetro β ser possível caracterizar a taxa de avarias ao longo de toda a “curva da banheira”, ou seja, através do ajuste deste parâmetro é possível ajustar a distribuição de Weibull de modo a corresponder a qualquer região e fase da curva da mortalidade [4].

Dada a não existência de falhas, num determinado componente, até um certo instante γ é possível aplicar a distribuição de Weibull de 3 parâmetros que, aplicada à notação da análise de fiabilidade, toma a forma [4]:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \cdot e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}, \quad \begin{cases} f(t) > 0 \\ t \geq \gamma, & -\infty < \gamma < \infty \\ \beta, \eta > 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Onde os três parâmetros se clarificam:

- **γ – parâmetro de localização:** limite inferior do intervalo de tempo considerado, ou seja, idade para a qual se verificou a primeira avaria.
- **η – parâmetro de escala:** medida do valor de tendência central da distribuição. Intervalo de tempo entre γ e t no qual se verificam 63.2% das falhas [8].
- **β – parâmetro de forma:** indicador de tendência para a existência de uma concentração de probabilidade em torno do valor médio da distribuição [4].

As funções fiabilidade e taxa de avarias tomam então as seguintes fórmulas [4]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (2.19)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.20)$$

Poder-se-á deparar com situações onde haja interesse em considerar que o equipamento pode originar falha a partir do momento em que o mesmo é instalado, assumindo assim o parâmetro de localização γ o valor nulo, $\gamma = 0$, reduzindo a complexidade da expressão 2.18 que se torna na mais simples distribuição de Weibull de dois parâmetros.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad \begin{cases} f(t) > 0 \\ t \geq 0 \\ \beta, \eta > 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

Neste caso as funções fiabilidade e taxas de avarias tomam as seguintes fórmulas [4]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.22)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (2.23)$$

Como suprarreferido, a distribuição de *Weibull* é bastante apreciada em cálculos de engenharia face à sua versatilidade e adaptabilidade a qualquer período de vida do componente, algo que só é possível face à sensibilidade que está função tem a variações dos seus parâmetros. Decidiu-se abordar esta distribuição de fiabilidade, ainda que sem aplicação prática na presente dissertação, com o objetivo de servir de base teórica para a proposta de trabalhos futuros efetuada no cap. 6.2.

2.3. Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade

A Fiabilidade, a manutibilidade e a disponibilidade são três conceitos bastante importantes na manutenção uma vez que servem como indicadores de *performance* de um ativo. Após definido o conceito de fiabilidade, segue-se a definição dos restantes conceitos e a perceção da relação existente entre eles e como articulados contribuem para a eficiência do processo de manutenção.

2.3.1. Manutibilidade

Segundo a terminologia de manutenção, presente na Norma NP EN 13306 [5], a manutibilidade define-se como “a aptidão de um bem sob condições de utilização definidas de ser mantido ou reposto num estado em que possa cumprir uma função requerida depois de lhe ser aplicada manutenção em condições determinadas, utilizando procedimentos e meios prescritos”, ou seja, traduz a facilidade de acesso ao equipamento aquando da necessidade de reposição dos parâmetros operacionais bem como a capacidade de manter os mesmos [7].

O parâmetro mais utilizado para a medição deste indicador é o tempo médio de reparação MTTR ou menos comumente, o seu inverso, a taxa de reparação μ , que traduz o número médio de operações de manutenção por unidade de tempo.

Para simplificação de cálculos ou devido à fraca representatividade que os tempos logísticos e burocráticos têm face ao tempo de reparação, ou mesmo pelo desconhecimento destes, assume-se que o MTTR representa o tempo de inatividade operacional de um sistema. De facto, o tempo médio de inoperacionalidade de um sistema, *Mean Down Time* (MDT) corresponde a todo o período em que o sistema não se encontra disponível para assegurar a função requerida. Analogamente, o Mean Up Time (MUT) corresponde ao tempo médio de operabilidade e refere-se ao período de tempo que o sistema se encontra em bom funcionamento e a assegurar a função requerida (figura 7).

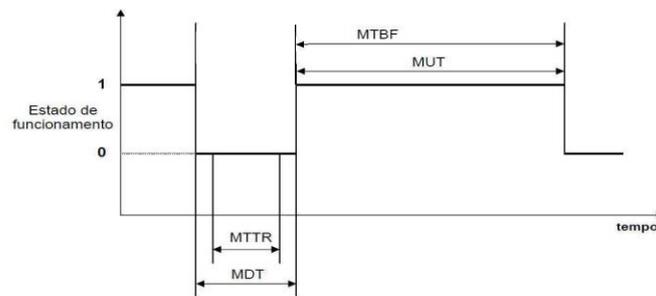


Figura 7 - Tempo médio de operacionalidade e tempo médio de inoperacionalidade, [8]

A fiabilidade sendo o reflexo não só das fases de conceção e fabrico do componente, mas também, das condições operacionais, reflete a frequência com que as falhas acontecem. No entanto, se o equipamento dispuser de boas condições de acessibilidade e conseqüentemente, de manutibilidade, garante-se assim um aumento de disponibilidade do equipamento pois as falhas poderão ser reparadas de uma maneira eficiente.

2.3.2. Disponibilidade

Segundo a terminologia de manutenção, presente na Norma NP EN 13306 [5], disponibilidade define-se como “a aptidão de um bem para estar em estado de cumprir uma função requerida em condições determinadas, num dado instante ou em determinado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários meios externos”, ou seja, traduz a probabilidade que um dado equipamento tem de num dado instante ser requerida a sua função e este se encontrar operacional de modo a cumprir essa mesma função.

Ao contrário da fiabilidade, a disponibilidade não se preocupa com o número de falhas de um dado sistema, mas sim com o estado de operacionalidade, num dado instante, quando as suas funções sejam requeridas.

Existem dois tipos principais de disponibilidade (representado pela letra *A* da palavra anglo-saxónica *Availability*) característicos de sistemas reparáveis:

- **Disponibilidade intrínseca** – característica do equipamento definida como a probabilidade deste se encontrar em funcionamento satisfatório em qualquer momento quando utilizado em condições especificadas e um ambiente ideal de apoio (dado pelo fabricante). Este tipo de disponibilidade relaciona-se com a fiabilidade e a manutibilidade ao incorporar o MTBF e o

MTTR, desmarcando-se dos tempos logísticos e burocráticos através da seguinte expressão [7]:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.24)$$

- **Disponibilidade operacional** - definida como a probabilidade do equipamento se encontrar em funcionamento satisfatório em qualquer momento quando utilizado em condições especificadas e num ambiente real de operação, havendo agora a necessidade de contabilizar os tempos administrativos. Trata-se da relação entre o MUT e o tempo total (MUT + MDT) espelhando não só a fiabilidade e a manutibilidade, mas também a eficiência da organização da manutenção [7]:

$$A_o = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (2.25)$$

A disponibilidade sendo um rácio da fiabilidade e manutibilidade permite a construção da tabela 1, onde se consideram os casos de variação destes últimos dois parâmetros e respetivas consequências na disponibilidade do equipamento.

Tabela 1 - Relação entre Fiabilidade, Manutibilidade e Disponibilidade, [11]

Fiabilidade	Manutibilidade	Disponibilidade
— Constante	▼ Diminui	▼ Diminui
— Constante	▲ Aumenta	▲ Aumenta
▲ Aumenta	— Constante	▲ Aumenta
▼ Diminui	— Constante	▼ Diminui

Da tabela apresentada podemos retirar certas ilações:

- Ao aumentar o tempo necessário à reparação dos equipamentos diminuámos a manutibilidade e a disponibilidade por aumento da inoperabilidade.
- Ao ter uma fiabilidade elevada a disponibilidade partilhará do mesmo comportamento pois o equipamento tem maior probabilidade de estar a funcionar sempre que o seu funcionamento é requerido.

Por vezes é pretendido também que se obtenha a disponibilidade de um determinado sistema ao longo de um dado período de tempo, como tal podemos recorrer à seguinte fórmula [7]:

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} + \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \cdot e^{-(MTBF^{-1} + MTTR^{-1}) \cdot t} \quad (2.26)$$

2.4. Metodologia RAM

A metodologia *RAM*, acrónimo de *Reliability Availability Maintainability* (Fiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade), trata-se de uma ferramenta normalmente utilizada em fase de *design* de projeto na qual um processo produtivo pode ser estudado visando maximizar a sua produtividade e o seu lucro, ao diminuir os custos de manutenção, reduzindo os riscos de falhas e consequentes acidentes. Trata-se de um caso particular da metodologia *RAMS* onde se inclui o fator *Safety*, sendo uma ferramenta utilizada na tomada de decisões tendo em conta a relação custos/benefícios do processo genérico a analisar.

Não só aplicável à fase de *design*, para um dado sistema produtivo, através da análise *RAM* é possível apontar quais as áreas de maior vulnerabilidade que possam afetar a disponibilidade operacional e quantifica quais os ativos (e as suas respetivas atividades de manutenção) têm maior significado no tempo de inatividade. Através desta informação, todo o *design* do sistema pode ser otimizado, incluindo a disposição dos equipamentos (permitindo um mais fácil acesso à manutenção), tipo e níveis de redundâncias bem como planos de manutenção preventiva.

Tipicamente uma análise *RAM* começa pela definição da unidade ou sistema industrial que se pretende estudar fazendo-se de seguida uma descrição funcional da mesma onde se apontam quais as subfunções (necessárias à concretização da função principal) bem como quais os equipamentos ou componentes responsáveis pelas mesmas. O diagrama funcional reúne esta informação podendo um equipamento ou componente participar em mais do que uma função ou subfunção. O passo seguinte será uma análise *HazOp* que consiste na identificação de possíveis perdas de funcionalidade produtiva e associação das mesmas a determinados equipamentos e componentes que serão abordados na análise *FMECA* – *Failure Modes Effects and Criticality Analysis* (análise de modos de falha e componentes críticos) onde se identificam os modos de falha e definem os critérios de severidade, frequência e detetabilidade com os quais se fará uma matriz de criticidade. Uma árvore de falhas ou de eventos pode ser necessária quando a falha de um equipamento por si só não cause a perda de funcionalidade do sistema. Pode-se ainda aplicar a metodologia *RCM* através da análise de Pareto de modo a selecionar os modos de falha críticos associados aos componentes identificados na matriz de criticidade. Finalmente planeiam-se tarefas de manutenção visando a mitigação de falhas. [14,15].

2.4.1. Métodos e Ferramentas da metodologia RAM

A implementação da metodologia carece de determinados métodos e técnicas que garantam a sua correta introdução. Pretendem-se abordar as fases principais desta metodologia e, como tal, começar-se-á pela Análise Funcional, onde se seguirá a análise *FMECA* e a Análise de Árvore de Falha culminando nos Diagramas de Blocos Funcionais onde se fará a diferenciação dos possíveis arranjos de blocos e consequentes efeitos na fiabilidade do sistema.

2.4.1.1. Análise Funcional

Para concretização de um objetivo operacional é necessário garantir a execução de determinadas funções (por parte dos equipamentos) cuja importância é dada segundo a maneira como uma cessação dessa função condicionaria a realização deste objetivo operacional.

Uma análise funcional permite decompor a função principal (do sistema a ser analisado) em funções de nível inferior que articuladas entre si garantem o desempenho da função-mãe. Ao proceder desta forma é possível, não só, perceber os limites físicos e operacionais de cada setor responsável pelo desempenho de cada subfunção e organizar o layout do sistema de modo a harmonizar o processo de manutenção[9].

Esta ferramenta é concretizada numa tabela onde se listam as subfunções principais bem como os componentes responsáveis pelo desempenho dessas mesmas funções onde se destaca a possibilidade de um componente poder desempenhar mais do que uma função.

2.4.1.2. FMECA

Esta ferramenta pode incidir sobre os equipamentos ou sobre as funções desempenhadas, ou seja, a listagem dos modos de falha pode ser feita relativamente à perda de funcionalidade do equipamento ou, alternativamente, relativamente à perda de funcionalidade da função. Por uma questão de simplicidade é comum ser utilizada a segunda situação pois permite atribuir a falha de um equipamento como a causa responsável pela perda de uma função.

O FMECA é constituído por duas partes. Começa-se por uma análise FMEA (Failure modes and Effects Analysis) e termina-se com uma CA (Criticality Analysis)

Uma análise FMEA começa com a listagem dos modos de falha possíveis para cada equipamento associado à função ou subfunção definida previamente na análise funcional. De facto, cada função pode ter um ou mais modos de falhas, sendo que, para cada um deles poderemos associar uma causa (razão que levou a perda de funcionalidade – geralmente por falha de um equipamento ou trabalho em condição deficiente do mesmo) e um determinado efeito (o resultado da perda de funcionalidade daquela função, que consequências terá na função principal ou nas restantes subfunções).

A *Criticality Analysis* consiste na avaliação da severidade e ocorrência da falha atribuindo posteriormente uma prioridade. A avaliação da severidade tem em conta o impacto da falha na missão e a segurança do equipamento e pessoal enquanto que a avaliação da ocorrência avalia a frequência com que a falha ocorre.

Ainda nesta fase procede-se à criação de escalas de severidade e ocorrência (ou frequência) que permita atribuir uma determinada classificação para cada modo de falha separando as falhas como pouco críticas (zona verde), críticas (zona amarela) ou muito críticas (zona vermelha).

A fórmula para a criticidade será dada por [10, adaptado]:

$$\text{Críticidade} = \text{Severidade} * \text{Ocorrência}$$

(2.27)

A escolha dos limites para cada uma das classificações supra mencionadas é geralmente feito pela empresa onde será implementado o sistema a estudar.

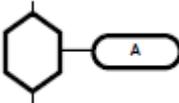
Esta análise termina com uma matriz de criticidade onde os pontos, representando os modos de falha, são representados em cada uma das diferentes zonas de cor e posteriormente medidas corretivas obrigatórias, recomendadas ou opcionais, respetivamente para as zonas vermelha, amarela e verde, serão tomadas.

2.4.1.3. Árvore de Falha

A análise de árvore de falha é um caso particular da análise de condição de falha (ferramenta que permite o controle e identificação de causas de falhas apoiando a tomada de eficazes ações corretivas) que se baseia na construção de um fluxograma lógico onde se relacionam todos os possíveis eventos causadores de falha de um determinado componente.

A construção do fluxograma começa com um evento de topo (falha principal), seguindo-se, depois, de “alto a baixo” os eventos intermédios (falhas intermédias) e os eventos básicos (falhas básicas). A articulação entre todos estes níveis de eventos é garantida recorrendo a relações lógicas, representadas pela sua simbologia normalizada, as portas lógicas (tabela 2).

Tabela 2 - Portas Lógicas Árvore de Falha, adaptado de [4]

Nomenclatura e simbologia utilizada em Análise de Árvore de Falha	
	EVENTO FALHA
	EVENTO FALHA BÁSICO ou PRIMÁRIO (ou como tal considerado no âmbito da análise em causa)
	PORTA “OU” (GATE “OR”¹⁸) : o <i>output</i> verifica-se se ou um ou outro (ou outro, etc.) dos <i>inputs</i> , ou ambos (ou suas combinações), se verificarem (“OU inclusivo”)
	PORTA “E” (GATE “AND”) : o <i>output</i> só se verificará se um e outro (e outro, etc.) <i>input</i> se verificarem
	PORTA “INIBIÇÃO” (GATE “INHIBIT”) : o <i>output</i> só se verifica se há <i>input</i> e se a condição “A” está presente

A construção da árvore de falha constitui uma ferramenta de especial interesse para a concretização dos diagramas de blocos uma vez que a lógica booleana através das suas portas lógicas AND e OR permite definir o diagrama de blocos do sistema.

Esta metodologia pode ter para além da vertente qualitativa, evidente pelo relacionamento lógico dos eventos que tomam parte no processo de falha, uma vertente quantitativa quando junto a cada evento básico é indicado um valor de probabilidade de falha ou uma taxa de avarias que permita a efetivação de cálculos fiabilísticos [4]

2.4.1.4. Diagrama de Blocos Funcionais

Em fiabilidade, um sistema é definido por um conjunto de componentes ordenados e conectados, sob a forma de blocos funcionais, de acordo com o efeito que a falha de cada bloco terá na fiabilidade geral do sistema [12].

É possível determinar a operabilidade de um sistema a partir dos seus componentes (ou blocos funcionais). Cada bloco será visto como um interruptor que se encontra fechado caso o componente esteja operacional ou aberto caso se encontre em falha. O sistema global estará operacional se for possível determinar um circuito de "interruptores fechados" desde o seu *input* até ao *output* [12].

Relativamente à definição dos blocos deve-se garantir os seguintes pressupostos [12]:

- Cada bloco deverá representar o máximo de componentes de modo a simplificar o diagrama
- A função correspondente deverá ser facilmente identificável
- Os blocos deverão ser independentes entre si em termos de falha, não sendo afetados pela probabilidade de falha dos restantes
- Dever-se-á separar as tecnologias associadas aos equipamentos por cada bloco (e.g. componentes mecânicos e componentes eletrónicos)

Estes blocos poderão ser arranjados segundo uma lógica série, uma lógica paralelo ou até mesmo uma combinação das duas anteriores resultando numa lógica série-paralelo.

2.4.1.5. Sistema Série

Um sistema série trata-se da combinação de dois ou mais blocos cujo sucesso do sistema só é possível se verificar sucesso de todos os componentes. Neste caso o diagrama de blocos toma a forma representada na figura 8:

Para componentes independentes entre si em que cada um, em exclusividade, desempenhe uma função necessária ao sucesso do sistema, a fiabilidade e disponibilidade do sistema série R_s e A_s tomam a forma [10,12]:

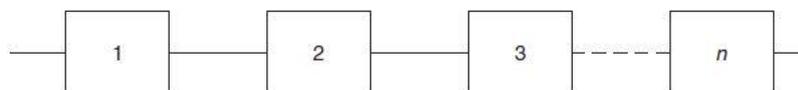


Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema série de n componentes, [12]

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.28)$$

$$A_s(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t) \quad (2.29)$$

2.4.1.6. Sistema Paralelo

Um sistema paralelo, R_p , trata-se da combinação de dois ou mais componentes cujo sucesso do sistema é garantido pelo sucesso de pelo menos um dos componentes. Neste caso o diagrama de blocos toma a forma representada na figura 9:

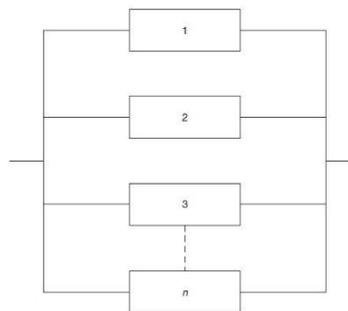


Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema paralelo de n componentes, [12]

Para componentes independentes entre si em que cada um, em exclusividade, desempenhe uma função necessária ao sucesso do sistema, a fiabilidade e a disponibilidade do sistema paralelo R_p e A_p tomam a forma [10,12]:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (2.30)$$

$$A_p = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - A_i(t)] \quad (2.31)$$

Um sistema paralelo restrito é uma particularidade do sistema paralelo que difere do mesmo na medida em que a operacionalidade do sistema requer a operacionalidade de m componentes operativos em simultâneo num total de n existentes [4]. Neste caso destacam-se as seguintes possibilidades (tabela 3):

Tabela 3 - Quadro de estados de um sistema de 3 componentes, [4]

ESTADO DO SISTEMA			PROBABILIDADE DO ESTADO DO SISTEMA
ESTADO N.º	N.º COMPONENTES INOPERATIVOS INOP (k)	N.º COMPONENTES OPERATIVOS OP (n-k)	$P_{(k)} \equiv F_{(k)} \equiv R_{(n-k)}$
0	0	3	$P_{(0)} = R_1 R_2 R_3$
1	1	2	$P_{(1)} = R_1 R_2 F_3 + F_1 R_2 R_3 + R_1 F_2 R_3$
2	2	1	$P_{(2)} = R_1 F_2 F_3 + F_1 R_2 F_3 + F_1 F_2 R_3$
3	3	0	$P_{(3)} = F_1 F_2 F_3$

Para um sistema composto por três componentes há que destacar os possíveis estados onde k representa o número de componentes inoperacionais estando os restantes $n - k$ componentes operativos:

Para a construção da tabela destaca-se o uso do teorema da probabilidade de ocorrência conjuntiva para os casos extremos, ou seja, $P_0 = R_1 R_2 R_3$ e $P_3 = F_1 F_2 F_3$ e do teorema de ocorrência alternativa para os casos intermédios onde haja a necessidade de evidenciar todas as possibilidades do(s) elemento(s) que falha(m), obtendo $P_1 = F_1 R_2 R_3 + R_1 F_2 R_3 + R_1 R_2 F_3$ e $P_2 = F_1 F_2 R_3 + F_1 R_2 F_3 + R_1 F_2 F_3$.

Finalmente concretiza-se que para o cálculo de fiabilidade de um sistema deste tipo obtemos a seguinte expressão [4]:

$$R_{(n-k) \geq m} = F_{(k) \leq n-m} \quad (2.32)$$

2.4.1.7. Sistema *Stand-by*

Um sistema *stand-by* (figura 10) é concebido de modo a que a função seja assegurada por apenas um dos componentes do sistema, com as restantes unidades redundantes que vão sendo postas em serviço à medida que uma unidade que se encontra a desempenhar a função, se avarie. Trata-se, portanto, de um sistema dito tolerante à falha cuja entrada de serviço do segundo componente colmata a perda de funcionalidade do primeiro.

Para haver esta comutação de funcionamento é imprescindível a existência de um sensor comutador (SC), onde se destacam dois estados: sensação (SC_s) e comutação (SC_c) [4]. O diagrama de blocos de um sistema deste tipo pode ser dado por:

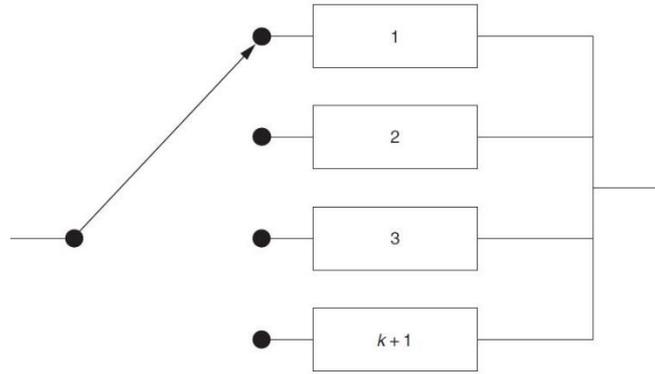


Figura 10 - Diagrama de blocos sistema stand-by, [12]

Relativamente a este tipo de sistemas fazem-se as seguintes assunções [12]:

- O mecanismo de *switch* é perfeito
- Todos as unidades são idênticas e independentes
- Não existe degradação dos componentes *stand-by* aquando do tempo de espera

Tendo em conta que a unidade em *stand-by* tem de ser mantida numa condição de prontidão destacam-se os seguintes acontecimentos para o sucesso do sistema no intervalo]0, t[(figura 11):

- A unidade principal trabalha até t
- A unidade principal falha em t_1 ($0 < t_1 < t$), o sensor comutador em sensação, SC_s , e a unidade em *stand-by* em vazio, Sb_v , funcionam até t_1 , o sensor comutador em comutação, SC_c , funciona em t_1 , e unidade em *stand-by* em carga trabalha entre t_1 e t . (figura 11)

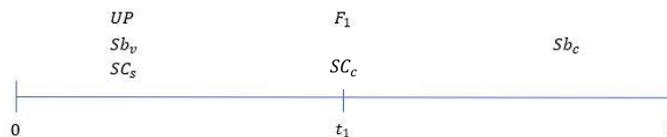


Figura 11 - Funcionamento de unidade principal, sensor comutador e unidade stand-by para missão com duração t

Considerando um sistema com n unidades iguais a fiabilidade será dada por [4]:

$$R_{sb}(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda_1 t)^k \cdot e^{-\lambda_1 t}}{k!} = e^{-\lambda_1 t} \left[1 + \lambda_1 t + \frac{(\lambda_1 t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda_1 t)^{n-1}}{(n-1)!} \right] \quad (2.33)$$

A apresentação deste tipo de diagrama de blocos tem como finalidade o apoio teórico não para a aplicação da metodologia apresentada ao longo da dissertação, mas sim, para no futuro, aquando do desenvolvimento da análise de condição de falha, possa ser aplicada ao se definirem quantas bombas serão necessárias à elevação do fluido mediante o caudal que chega à infraestrutura.

3. Apresentação Grupo Águas de Portugal

O Grupo AdP, foi criado em 1993 e é atualmente composto por 12 empresas na área de abastecimento de águas para consumo humano e saneamento de águas residuais [13].

De facto, nos últimos anos o grupo tem vindo a sofrer reestruturações internas levando à agregação e destaque entre empresas originando respetivamente uniões e cisões (figura 12). Até ao ano de 2014 o grupo era composto por 19 empresas situação que se alterou em 2015 passando apenas a totalizar 8 empresas numa agregação que teve como objetivo balancear o equilíbrio económico ao unirem-se empresas de maior com menor rácio Habitante por Quilómetro (para a mesma área de abrangência quanto maior a população servida maior será a representatividade da empresa, algo que é perceptível, dado que as instalações necessárias ao suporte dos utilizadores terão maiores dimensões e consequentemente maiores custos de implantação). Novamente em 2017 voltou-se a alterar a configuração do Grupo, desta vez resultando numa cisão de empresas dando origem a 4 novas e fixando o número total nas atuais 12 [16].

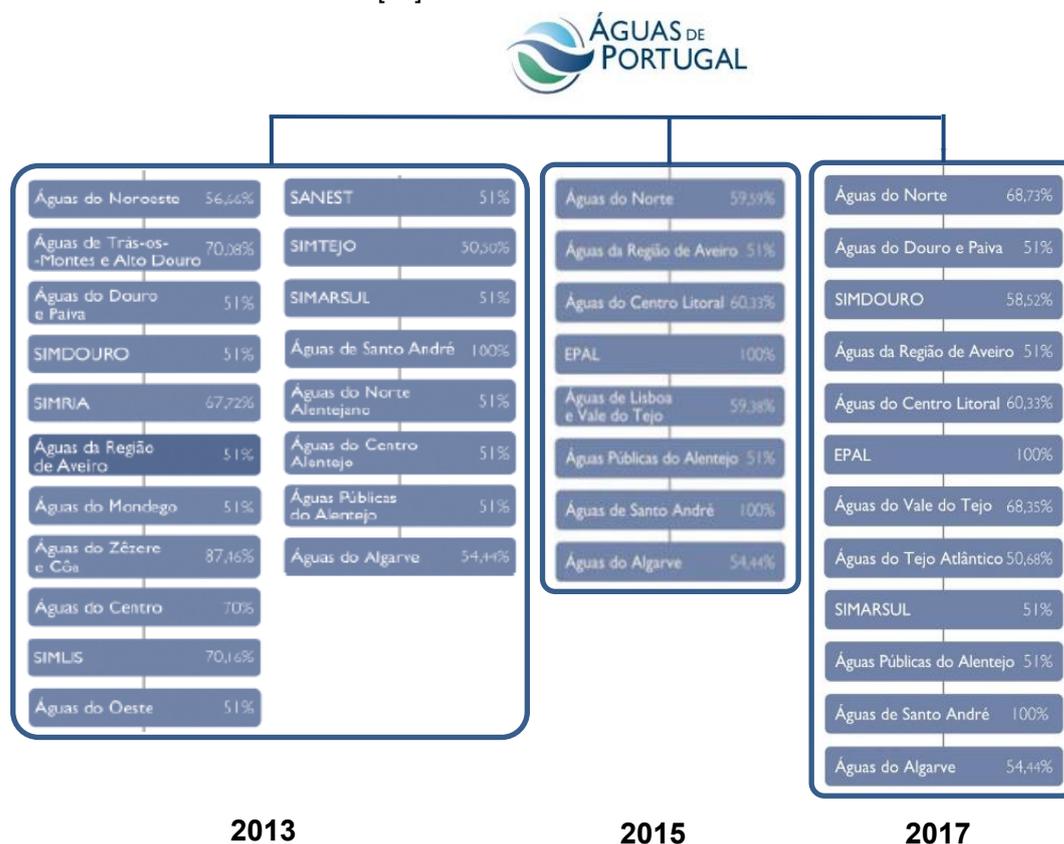


Figura 12 - Empresas do Grupo AdP resultantes dos processos de reestruturações internas, adaptado de [14,15 e 16]

As áreas de negócio do Grupo são o Abastecimento e o Saneamento em Alta e em Baixa. Atualmente, 16% das empresas do grupo dedicam-se exclusivamente ao abastecimento e 25% ao saneamento, sendo a restante fatia ocupada com participação simultânea nas duas áreas de negócio (Anexo A).

Relativamente às infraestruturas existentes no grupo destacam-se nos sistemas de Abastecimento a presença de 1155 unidades de captação (situadas em barragens, albufeiras, rios ou lençóis de água subterrâneos), 157 estações de tratamento de água (ETA) onde estão implementadas 686 Estações elevatórias (EE), fazendo a ligação à população através de uma rede de distribuição com 17026 Km. No que diz respeito aos sistemas de Saneamento destaca-se a rede de drenagem de 9613 Km que permite fazer a ligação entre a população e as 992 estações de tratamento de águas residuais (ETAR) existentes onde se encontram instaladas 2033 Estações Elevatórias (tabela 4) [17].

Tabela 4 - Inventário Infraestruturas Grupo AdP

Área de Negócio			
Tipologia	Abastecimento	Saneamento	TOTAL
Unidades de Captação	1155	-	1155
ETA	157	-	157
ETAR	-	992	992
Estações Elevatórias	686	2033	2719
Rede de Distribuição [km]	17026	9613	26639

3.1. Entidades Reguladoras e Regulação Operacional

Nos sistemas em Alta, de abastecimento e saneamento que englobam todo o processo de tratamento e transporte desde a captação até à devolução em sistema hídrico sob condições ambientalmente seguras, as empresas do Grupo AdP prestam serviços a 234 municípios. Enquanto que nos sistemas em Baixa, ou seja, diretamente ao consumidor, uma percentagem de 11.2% da população é abrangida [13].

Em Portugal Continental graças a parceria entre empresas (onde o Grupo AdP tem maior ou menor participação) e os municípios locais é conseguida uma prestação de serviços a 80% da população em regime de saneamento e abastecimento [13].

Tanto o grupo AdP como os serviços multimunicipais sofrem o mesmo tipo de regulação da tarifa por parte da Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos – ERSAR – obedecendo esta à premissa de que *“Os preços e demais instrumentos de remuneração a fixar pelos municípios ... não devem ser inferiores aos custos directa e indirectamente suportados com a prestação desses serviços e com o fornecimento desses bens.”* - N.º 1 do artigo 16.º da Lei n.º 2/2007, de 15 de janeiro [13,18].

Esta regulação impõe-se devido as atividades em alta e baixa se regerem por um mercado do tipo monopólio com base na abrangência geográfica da rede explorada (número de habitantes servidos) visando assim reduzir a distorção de mercado em termos de oferta e as ineficiências resultantes da existência de um monopólio natural. Relativamente à fixação dos preços dos serviços das águas cobrados ao consumidor existe uma grande variação que pode ser explicada com o facto

de estes serem dependentes quer da titularidade do sistema, quer do modelo de gestão da entidade gestora [19].

No ano de 1993, constatou-se que Portugal apresentava grandes fragilidades nos sistemas de abastecimento e saneamento de águas residuais tornando difícil o acompanhamento das metas e imposições da União Europeia. Face a esta necessidade, em abril de 2000, surgiu o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais – PEAASAR I 2000-2006 aprovado pelo XIV Governo Constitucional que teve como função a estruturação de todo o setor de abastecimento de águas e saneamento de águas residuais no país [8]. Mais tarde, em 2007, o PEAASAR I foi modificado dando origem ao PEAASAR II 2007-2013, sendo, em 2014, renomeado de PENSAAR 2020 – Nova Estratégia para o Setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais [21].

Todo o esforço financeiro realizado nas últimas décadas permitiu uma evolução notável nos serviços públicos de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais, sendo que, ultrapassada a fase de investimento, o setor depara-se com novos desafios que exigem um foco na gestão eficiente dos recursos [22].

Resultante do balanço conjunto do PEAASAR II e do diagnóstico da situação à data da conclusão desse plano estratégico, foi desenvolvido no início de 2014, um plano estratégico para o setor e para o período de 2014-2020 no qual foram definidos 5 eixos estratégicos onde se enquadram 19 objetivos operacionais (OP) (figura 13), onde, dado o enquadramento desta dissertação se seleciona o eixo 3 – Otimização e gestão eficiente dos recursos e OP3.4 - Gestão eficiente de ativos e aumento da sua reabilitação.



Figura 13 - Eixos Estratégicos e Objetivos Operacionais do programa PENSAAR 2020, [22]

3.2. Ciclo Urbano da Água e Interligação com Áreas de Negócio

O setor das águas reparte-se em dois serviços distintos nomeadamente, o abastecimento de água para consumo e o saneamento de águas residuais urbanas. É importante fazer a distinção entre sistemas em Alta e sistemas em Baixa, podendo antecipar que sistemas em Alta constituem as grandes infraestruturas e os sistemas em Baixa os canais de distribuição entre as mesmas e os consumidores.

Relativamente aos sistemas de abastecimento, em Alta, na sua generalidade, compreendem todos os componentes que façam a união entre os sistemas em Baixa, responsáveis pela prestação do serviço de abastecimento de água aos consumidores em meio urbano ou industrial (distribuição e reservatório), e os meios hídricos de onde é feita a captação (figura 14) [23].

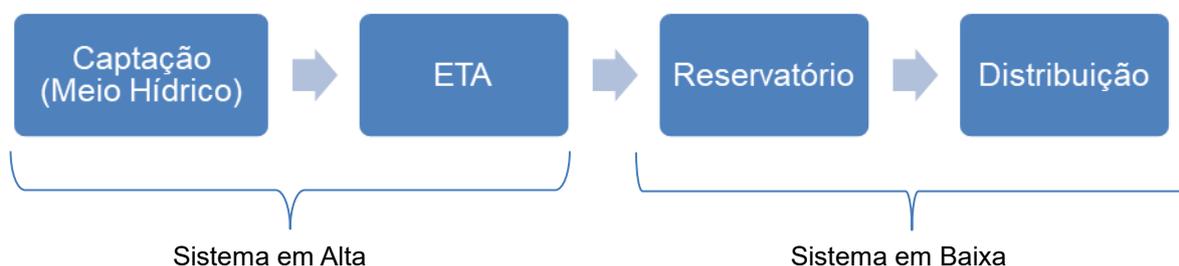


Figura 14 - Área De Negócio Abastecimento – Sistemas em Alta e Baixa, adaptado de [24]

O sistema de saneamento de águas residuais em baixa assegura a drenagem de águas residuais urbanas junto ao produtor, assegurando a sua chegada ao sistema em alta sendo este sistema constituído por um conjunto de componentes que permite a ligação do sistema em baixa ao ponto de rejeição – meio hídrico (figura 15). [11]

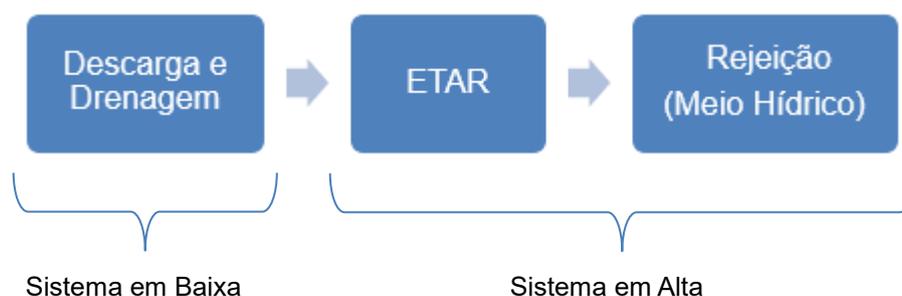


Figura 15 - Área de Negócio Saneamento - Sistemas em Alta e Baixa, adaptado de [25]

O ciclo urbano da água tem início com a sua captação em rios e albufeiras ou até mesmo lençóis de água subterrâneos. Posteriormente, esta é encaminhada para uma Estação de Tratamento de águas, ou ETA, onde sofre todo um processo de separação de resíduos e tratamento bacteriano (ver ponto 3.2.1) para que seja possível de ser armazenada e distribuída até às habitações.

A etapa seguinte consiste na descarga e drenagem das águas residuais pela rede de esgotos e coletores até uma Estação de Tratamento de Águas Residuais, vulgarmente descrita como ETAR, (ver ponto 3.2.2) onde sofre um processo de tratamento que garante que a água terá qualidade tal que

possa ser descarregada na natureza (novamente em rios e albufeiras) em condições ambientalmente seguras sem comprometer a saúde pública.

De seguida far-se-á uma caracterização das ETA, ETAR e EE onde se apresentam e descrevem os modos de funcionamento das várias etapas. Esta apresentação torna-se relevante na medida que permite ao leitor contextualizar-se acerca do funcionamento e processos da infraestrutura à qual será feita o estudo (EE), mas também devido a preocupação demonstrada pelo Grupo em alargar a metodologia apresentada às duas restantes infraestruturas.

3.2.1. Estação Tratamento de Águas

Uma ETA pode ser dividida em 2 linhas, a linha sólida e a linha líquida que juntas garantem a eliminação de agentes patogénicos causadores de doenças e/ou infeções tornando a água viável para consumo.

A linha sólida é responsável pela concentração e desidratação das lamas e águas provenientes da lavagem de filtros. Este processo confere ao produto deste processo uma consistência de pasta para que possa ser compactado e transportado para destino final de aterro de uma forma eficiente, ao diminuir a percentagem de água contida, reduzindo assim os custos associados.

A linha líquida pode ser dividida nas seguintes fases principais: gradagem, coagulação/floculação, decantação, filtração e desinfecção como pode ser evidenciado pela figura 17.

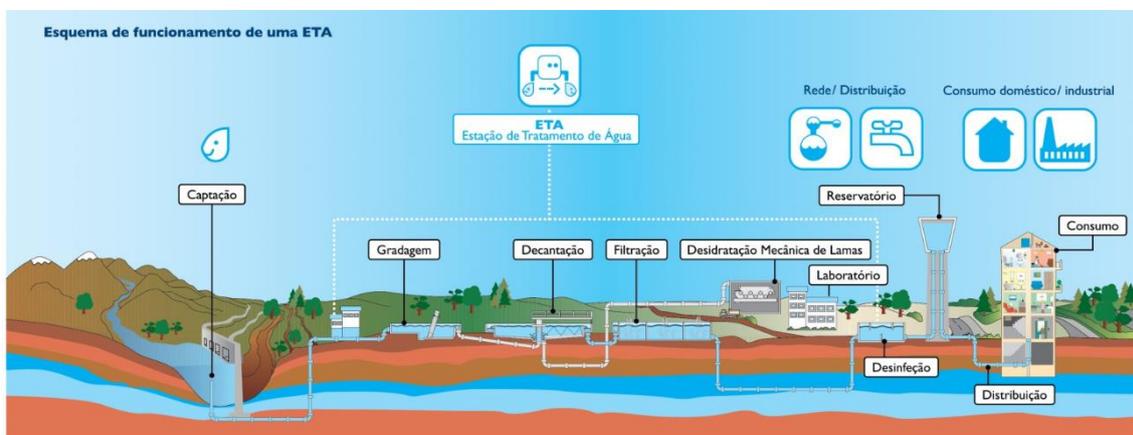


Figura 16 - Esquema de Funcionamento de uma ETA, [26]

- **Gradagem/Tamisagem** – Após chegada das águas à ETA provenientes da captação em barragens ou albufeiras ocorre uma remoção de detritos grosseiros como pedras, folhagens ou ramos que possam provocar anomalias nos equipamentos a jusante, por onde ocorrerá todo o processo de tratamento subsequente.
- **Coagulação e floculação** – Adição de reagente com propriedades coagulantes à água, responsável por juntar as partículas responsáveis pelo turvamento das águas em pequenos flóculos. Através de um agitador estes flóculos aglomeram-se originando o processo de floculação.

- **Decantação** - Os flocos devido à sua maior densidade depositam-se no fundo do órgão de decantação, formando uma lama e deixando uma camada superficial de água mais limpa. Estas lamas são limpas do fundo do decantador (poço onde este processo ocorre) podendo existir uma ponte rotativa que as encaminha para o centro onde são bombadas para uma linha de tratamento de lamas (linha sólida). Alternativamente a este processo poderá acontecer o processo de **flotação** que consiste na remoção de partículas aglomeradas em suspensão na água que são mantidos à superfície através de injeção de ar no fundo do flotador. Sob a ação de uma ponte raspadora, ou por movimento hidráulico, vamos ter a eliminação desta camada de resíduos e consequentemente uma limpeza da água.
- **Filtração** – consiste numa remoção ainda mais fina das partículas remanescentes através de um filtro de areia fina, antracite ou carvão ativado, havendo situações de mistura de vários destes leitos de filtração.
- **Desinfeção** - adição de cloro ou compostos clorados que garantam uma eliminação de organismos patogénicos prejudiciais à saúde humana. Alternativamente também é possível a existência de uma câmara de luzes ultravioleta onde a água circundante é filtrada por radiação, no entanto este processo tem vindo a ser substituído pelo primeiro devido ao seu custo inerente.
- **Tratamento de Lamas** – Paralelamente à linha líquida ocorre o processo de tratamento de lamas que visa a sua desidratação e espessamento com objetivo de envio para destino final.

Ao longo de todo este processo análises químicas são realizadas à água de modo a garantir que esta cumpre os padrões de qualidade e segurança impostos pela ERSAR e que possa ser armazenada e distribuída por condutas até aos locais de consumo.

3.2.2. Estação de Tratamento de Águas Residuais

A ETAR faz parte do sistema de saneamento, normalmente como último processo antes da descarga das águas residuais no meio ambiente, e tem como função receber e tratar as águas residuais de modo a poder descarregar o produto deste tratamento no meio hídrico em condições ambientalmente seguras sem constrangimentos para a fauna e flora local (Figura 17). Para tal destacam-se 4 fases de tratamento:

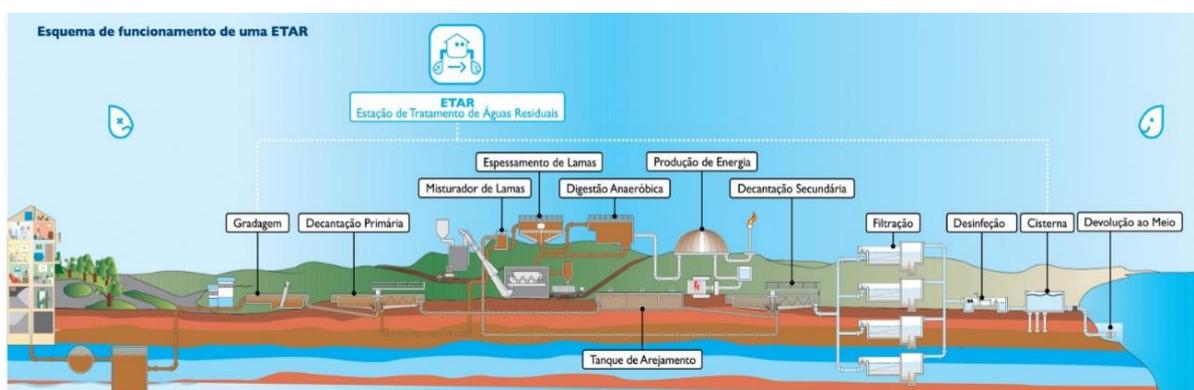


Figura 17 - Esquema de Funcionamento de uma ETAR, [27]

- **Tratamento preliminar:** Composto por uma primeira **Gradagem** e posterior **Desarenamento e Desengorduramento**. Tem como objetivo a remoção dos sólidos de maiores dimensões. A gradagem ocorre em duas etapas: primeiramente procede-se a uma gradagem mais grosseira (dimensões entre 40 e 60 mm) sendo seguida de uma gradagem mais fina (dimensões entre 3 e 6 mm) num processo conhecido como tamisação. Torna-se então necessário retirar todas as gorduras e areias ainda existentes. As areias serão removidas por sedimentação num processo semelhante à decantação. As gorduras serão removidas por ponte raspadora à semelhança do que acontece no processo de decantação em ETA.
- **Tratamento primário (este tipo de tratamento pode ou não estar presente dependendo da tipologia da ETAR):** Composto por uma **decantação** e **desodorização**. Dado que as águas residuais nesta fase possuem consideráveis quantidades de matéria orgânica em suspensão, é frequentemente utilizada uma etapa de decantação para promover a separação física desta carga poluente (por vezes é adjuvada por reagentes químicos).
- **Tratamento secundário:** Composto pelo **tratamento biológico** e uma **decantação secundária** (existente nas estações de tratamento com linhas convencionais e inexistente em estações com tratamento em sistemas *Sequencial Bach Reactor* ou Biofiltração). O tratamento biológico ocorre, de forma mais comum, num tanque biológico equipado com arejadores que garantem que o ar insuflado contém um teor de oxigénio tal que seja possível o crescimento de microrganismos que se irão alimentar da matéria orgânica presente na água, purificando-a. Com o crescimento desses microrganismos flocos vão sendo formados adquirindo peso e dimensões tais que se torna necessária uma nova decantação. Ainda durante o tratamento biológico poderá haver uma preocupação adicional com nutrientes como o fósforo e o azoto (responsáveis pela **eutrofização** – crescimento excessivo de plantas aquáticas) sobretudo quando a descarga mais a frente será feita para um rio ou uma lagoa, ou seja, onde exista a possibilidade de água quase estática.
- **Tratamento terciário:** Este tratamento ocorre em zonas sensíveis como zonas de descarga balnear e tem como principal função a remoção de bactérias sendo esta garantida pelo processo de **Desinfeção** por ultravioleta. As zonas sensíveis podem ser lagos naturais de água doce como estuários e águas costeiras, onde se destaque a possibilidade de acumulação (águas paradas) motivada pela fraca renovação de caudal ou águas doces de superfície destinadas à captação de água potável [28].
- **Desodorização:** o fluido de trabalho ao ser portador de matéria inorgânica promove a libertação de gases portadores de cheiros desagradáveis ao longo do processo, havendo, portanto, a necessidade de recolha do ar contaminado para neutralização dos odores. Este processo ocorre por sucção sob condutas especializadas, sendo armazenados em reservatório onde se procede a uma mistura de reagentes (e.g. carvão ativado) pulverizados de modo a atenuar o cheiro característico, sendo posteriormente libertados para a atmosfera de uma maneira controlada.

3.2.3. Estações Elevatórias

Uma Estação Elevatória, ou EE, pode inserir-se num sistema em Alta de abastecimento, ETA, ou saneamento, ETAR. As condições a que uma EE se encontra sujeita num caso e noutro são bastante distintas prendendo-se estas diferenças na quantidade de resíduos transportados e na densidade do fluido elevado algo que motiva uma maior taxa de avarias numa EE de saneamento.

Num sistema em alta as infraestruturas são construídas de forma a aproveitar o potencial gravítico, tendo como objetivo a eficiência energética destes sistemas. As etapas seguintes terão sempre uma cota menor que a etapa anterior, algo que facilita o transporte da água durante todo o seu percurso na infraestrutura. As estações elevatórias têm como objetivo o aporte de energia ao sistema quando não é possível prosseguir com o transporte gravítico do fluido, garantindo operações como recirculação de fluido para uma etapa anterior e elevação de água para um ponto mais alto do processo para começar o seu processamento. De salientar que estes ativos são responsáveis por uma parte muito significativa do consumo energético de todo o sistema de abastecimento de água e saneamento de águas residuais.

Uma EE de saneamento pode ser dividida em 3 partes principais.

- **Pré-Tratamento:** Após chegada do caudal à estação elevatória, este é recebido numa caixa de entrada onde existe um seccionamento de segurança, chamado de zona de *by-pass* que é utilizada sempre que as condições de caudal forem excessivas, protegendo assim a estação elevatória. A par deste seccionamento existe um outro que dá origem à entrada na EE onde, frequentemente, ocorre uma primeira gradagem, mais grosseira, onde detritos de maiores dimensões são separados do fluido de trabalho.
- **Desarenação (podendo ou não existir dependendo da tipologia de EE):** Após remoção dos detritos de maiores dimensões proceder-se-á à remoção de areias ou outras partículas mais leves que ainda se encontrem em suspensão. Nesta fase, existe uma recirculação do fluido para a etapa anterior de modo a diluir o caudal que chega à estação elevatória reduzindo assim os esforços a que os equipamentos se encontram sujeitos.
- **Elevação:** após se obter uma mistura mais homogénea o fluido é então bombeado para destino final. É importante garantir que as bombas operam nas melhores condições, nomeadamente sem a presença de areias (causadoras de deformações no impulsor) ou detritos maiores (causadores de entupimento nas bombas) de modo a garantir que a estação elevatória cumpre a sua função durante o maior período possível.

Deverá ser salientado que, sobretudo nos sistemas de drenagem, transporte e tratamento de águas residuais, as estações elevatórias apresentam uma larga maioria de situações de falha, resultado das características do fluido e condições de operação.

3.3. Estruturação do processo de Manutenção

Materializando a preocupação crescente do Grupo AdP no correto funcionamento dos seus ativos como forma de rentabilização após um período de largos investimentos definiu-se um plano de gestão de ativos que refletem a preocupação quer operacional quer de manutenção visando a maximizar o retorno financeiro destes ativos.

Como resposta a esta vertente de operação e manutenção o Grupo criou um processo de inventariação que permitirá monitorizar e localizar os seus ativos, as condições operativas e ao mesmo tempo perceber quando e porque, atividades de manutenção (corretivas ou preditivas) são requeridas.

Este processo de inventariação foi realizado em todas as empresas do Grupo, assegurando assim a identificação de todos os ativos existentes em cada empresa, quais as suas características técnicas e operacionais e qual a sua localização (em que tipo de infraestrutura se encontra instalado).

São utilizados *softwares* comerciais diferindo de acordo com a sua aplicação na Gestão de Ativos: manutenção, financeira e operação.

Para a gestão da manutenção, também denominado de Sistema de Gestão e Manutenção de Ativos – SMGA, destacam-se os *softwares*: Serviços, Aplicações e Produtos para manutenção preventiva – **SAP-PM** e **Aquaman** (ganhando especial destaque os dois primeiros, uma vez que foi através da plataforma *Aquaman* que foram transmitidos os dados de manutenção corretiva utilizados nesta dissertação e através de SAP-PM foram obtidos alguns custos relativos a ordens de trabalho).

Para a gestão financeira, destaca-se o *software* Serviços, Aplicações e Produtos para contabilidade de ativos – **SAP-AA**, responsável pela contabilização de investimentos feitos (na fase de construção e aquisição) nos ativos.

Para a gestão operacional destaca-se o uso do *Software* de monitorização ou telegestão (*Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA*) e o **Navia**, sendo o primeiro indispensável para os propósitos desta dissertação como se verá mais a frente.

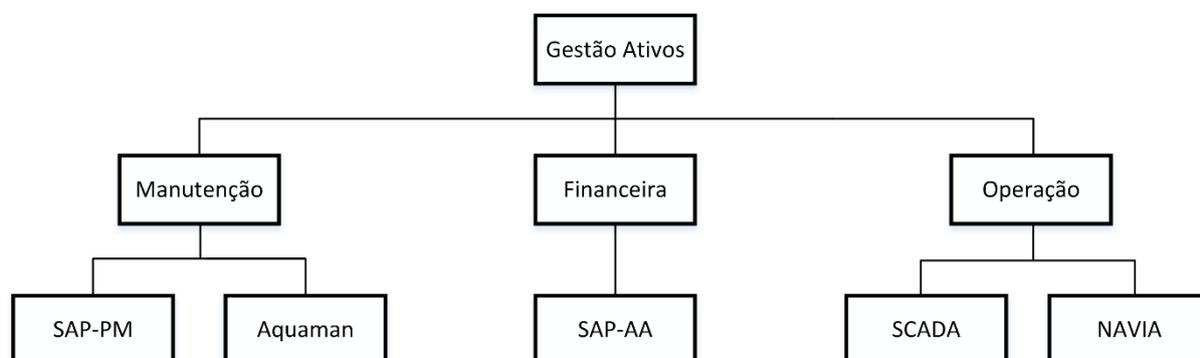


Figura 18 - Software comercial em Gestão de Ativos, adaptado de [29]

3.3.1. Localizações Operacionais

De modo a garantir uma adequada articulação entre os diferentes softwares utilizados na Gestão de Ativos destacam-se a implementação das localizações operacionais que consistem num código interno, criado em cada empresa aquando do desenvolvimento da sua estrutura analítica identificando a infraestrutura e durante o processo de inventariação, identificando o local físico do ativo na infraestrutura onde se encontra instalado.

É nestas localizações que são criadas os pedidos de trabalho – PT e as ordens de trabalho – OT, bem como, registados os históricos de manutenção. Dependendo do nível no código de localização operacional, será possível identificar a infraestrutura (nível 6), localização do ativo (equipamento) (nível 8), ou o próprio ativo ou componente (nível 9) intervencionado no processo de manutenção.

O mesmo código de localização será o utilizado em SAP-PM e SAP-AA permitindo uma gestão integrada entre a componente manutenção e financeira, possibilitando uma monitorização adequada de custo e nos casos aplicáveis da movimentação de ativos entre infraestruturas.

Assim, as localizações operacionais correspondem a um código inequívoco para cada nível da cadeia do diagrama em árvore (figuras 19 e 21) que quando acoplados formam o chamado código de localização (figura 22) que, como se verá à frente no capítulo 4, será indispensável à análise de dados.

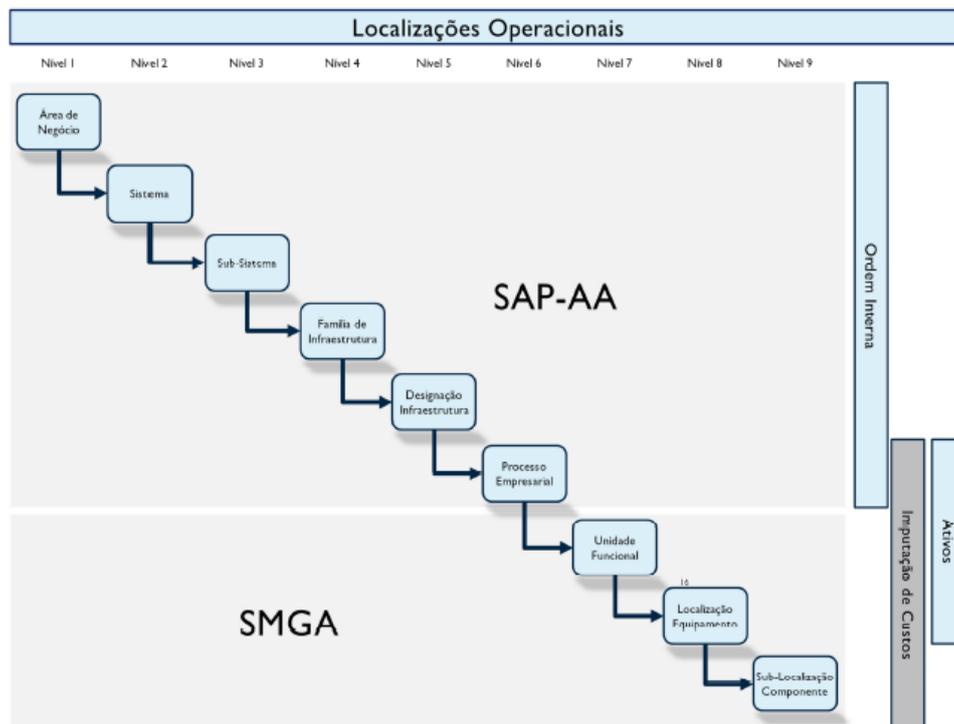


Figura 19 - Localizações Operacionais em SAP-AA e SMGA, [29]

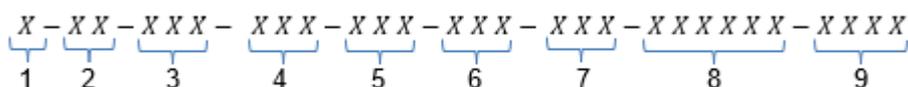


Figura 20 - Código de Localização tipo disponibilizado nas OT e respetivos níveis

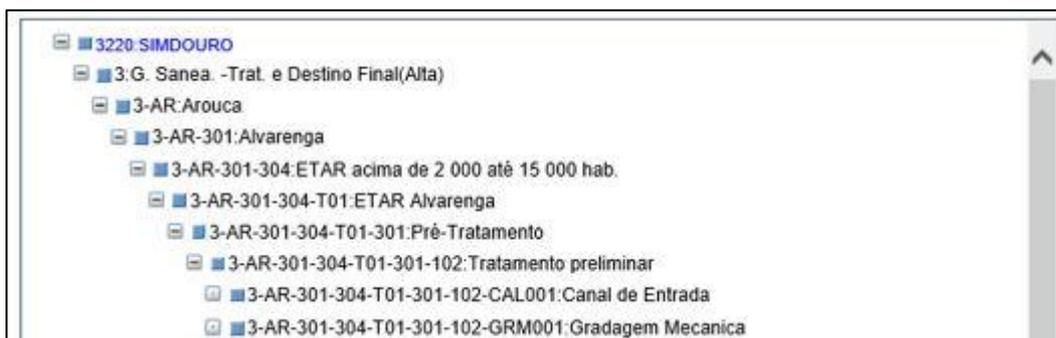


Figura 21 - Árvore de Localizações Aquaman, fornecido por Aquasis

Destaca-se a necessidade de alocar os PT e as OT ao nível 8 ou ao próprio ativo (equipamento) de modo a tornar inequívoco o processo de manutenção e o rastreo de falhas e histórico dos equipamentos.

Relativamente às localizações operacionais há a destacar os seguintes níveis:

- **Nível 1 – Área de Negócio:** Corresponde ao tipo de negócio da infraestrutura em questão, ou seja, abastecimento e saneamento de sistemas em Alta ou Baixa.
- **Nível 2 – Sistema:** Este conceito é deixado ao critério da empresa, sendo, geralmente, associada à área geográfica onde as infraestruturas estão inseridas.
- **Nível 3 – Sub-Sistema:** À semelhança com o nível anterior, também o conceito deste nível é deixado ao critério da empresa, sendo optado, normalmente, pela escolha de uma sub-localização do sistema como por exemplo a freguesia do município.
- **Nível 4 – Família de infraestruturas:** Para cada área de negócio dos sistemas em Alta, ou seja, abastecimento e saneamento a família de Infraestruturas está bem definida sendo dada pelas figuras 22 e 23.

FAMILIAS DE INFRA-ESTRUTURAS	
CODIGO	DESCRIÇÃO
101	Captações
102	Condutas
103	ETA acima de 100 000 habitantes
104	ETA acima de 20 000 habitantes
105	ETA até 20 000 habitantes
106	Estações Elevatórias
107	Reservatórios
108	Monitorização, Automação e Telegestão
109	Barragens

Figura 22 - Família de Infraestruturas para Sistema de Abastecimento em Alta, [29]

FAMILIAS DE INFRA-ESTRUTURAS	
CODIGO	DESCRIÇÃO
301	Colectores e Condutas
302	ETAR acima de 100 000 habitantes
303	ETAR acima de 15 000 habitantes
304	ETAR acima de 2 000 habitantes
305	ETAR até 2 000 habitantes
306	Estações Elevatórias
307	Emissários Submarinos
308	Monitorização, Automação e Telegestão
309	Túneis e Galerias

Figura 23 - Família de Infraestruturas para Sistema de Saneamento em Alta, [29]

- **Nível 5 – Designação de Infraestrutura:** Para cada local ou infraestrutura haverá uma caracterização técnica e operacional mediante as suas características.
- **Nível 6 – Processo Empresarial:** Corresponde à atividade ou fase de tratamento de uma determinada infraestrutura onde o ativo se encontra instalado figuras 24 e 25.

FAMILIAS DE INFRA-ESTRUTURAS \ ACTIVIDADES		100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
		Gestão Operacional	Captação	Telegestão / Despacho	Transportar Água Bruta	Tratamento em ETA	Tratamento Correctivo	Tratamento e Destino final Lamas	Adução	Monitorização	Armazenamento em Alta	Elevar
101	Captações	X	X				X			X		X
102	Condutas	X			X		X		X	X		
103	ETA acima de 100 000 habitantes	X				X		X		X		
104	ETA entre 20 000 e 100 000 habitantes	X				X		X		X		
105	ETA até 20 000 habitantes	X				X		X		X		
106	Estações Elevatórias	X					X			X		X

Figura 24 - Famílias de Infraestruturas e Atividades - Produção e Transporte (Alta), [29]

FAMILIAS DE INFRA-ESTRUTURAS \ ACTIVIDADES		300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313
		Pequenas Instalações de Tratamento	Pré-Tratamento	Tratamento Primário	Tratamento Secundário	Filtração / Desinfecção	Tratamento e Destino Final Lamas	Co-geração	Desodorização	Transporte / Drenagem em Alta	Elevar	Destino Final / Descarga Final	Telegestão / Despacho	Gestão Operacional	Monitorização
301	Colectores e Condutas									X		X		X	X
302	ETAR acima de 100 000 hab.		X	X	X	X	X	X	X			X		X	X
303	ETAR entre 15 000 e 100 000 hab.		X	X	X	X	X	X	X			X		X	X
304	ETAR entre 2 000 e 15 000 hab.		X	X	X	X		X				X		X	X
305	ETAR até 2 000 habitantes	X			X		X							X	X
306	Estações Elevatórias		X					X			X	X		X	X
307	Emissários Submarinos											X		X	X

Figura 25 - Famílias de Infraestruturas e Atividades - Tratamento e Destino Final (Alta), [29]

- **Nível 7 – Unidade Funcional:** Corresponde à localização que é dada ao ativo em questão dentro da fase de tratamento ou atividade relativamente à infraestrutura e caracteriza a sua zona funcional.
- **Nível 8 – Localização Equipamento:** Trata-se de uma posição física, ocupada pelo ativo, numa dada infraestrutura sendo a mesma estática e impermutável, ou seja, o ativo pode ser transferido para outra localização, no entanto, aquela localização não transita com o mesmo. Neste nível destaca-se a classe de equipamento que é única e inequívoca, permitindo assim, o rastreio do equipamento em questão.
- **Nível 9 – Sub-localização componente:** Corresponde à localização de um componente dentro de um ativo. De facto, existe uma relação direta entre este nível e o anterior uma vez que ambos partilham a mesma localização na infraestrutura (o nível 9 trata-se da localização do componente no ativo e o nível 8 da localização do ativo na infraestrutura).

O *software* de operação, SCADA, trata-se de um software capaz de monitorizar o estado e as condições operacionais dos equipamentos em tempo real, sendo assistido por um operador que, de acordo com as indicações deste software, poderá, em caso de necessidade, recorrer a outro software como o *Aquaman* para gerar um PT quando algum indicador não é o esperado (e.g. caudal de entrada

baixo por avaria do sensor de posição de uma válvula mural e a abertura não ser a esperada) ou quando o *software* indica a falha de um equipamento (figura 26).



Figura 26 - Sala de controlo genérica do SCADA, [30]

A manutenção no grupo segue uma linha que começa com a identificação da necessidade de intervenção, quer pela equipa operacional de manutenção aquando de uma visita periódica à instalação quer pela equipa responsável pelo visionamento e controle do SCADA, que é depois transformada num PT. Após a abertura de um PT, existe todo um fluxo até se chegar à OT (seguindo também esta um fluxo próprio). O processo de manutenção encerra com a validação do PT que deu origem à realização da OT, sendo, depois de vistoriada, também ela encerrada figura 27.

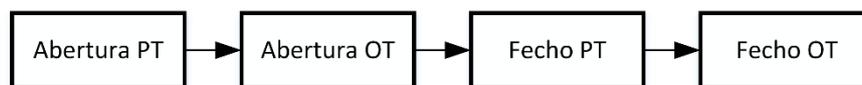


Figura 27 - Etapas processo manutenção

3.3.2. Pedidos e Ordens de Trabalho

Durante o período de funcionamento de uma infraestrutura os equipamentos são monitorizados quer pelos técnicos que supervisionam o sistema SCADA, quer por operadores que visitam regularmente a infraestrutura de modo calendarizado e programado. Aquando de deteção de qualquer situação anómala por parte do sistema os técnicos entram em contacto com os operadores deslocando-se, estes, ao local a fim de perceberem a realidade da situação. No local, é feita uma tentativa rápida de resolução do problema (e.g. desligar e rearmar o equipamento ou desobstruir o canal de passagem). Se estas ações se verificarem infrutíferas ou se o problema não for de resolução imediata, os operadores reportam e descrevem a falha ocorrida à manutenção, através da abertura de um Pedido de Trabalho (PT), utilizando o software de gestão da manutenção, o software *Aquamán*.

Todo o processo seguidamente descrito poderá ser consultado na figura em Anexo B.

Após criação do Pedido de Trabalho, o Responsável de Manutenção analisa-o e pode cancelar ou aceitar a solicitação criada. Existe ainda a possibilidade de o Responsável de Manutenção designar uma outra pessoa que considere mais adequada para dar seguimento ao PT por considerar não reunir as competências adequadas à decisão (e.g. uma reparação de uma bomba chegar ao

responsável de manutenção de edifícios). Após a validação do PT, o Responsável de Manutenção cria uma Ordem de Trabalho (OT), ficando o Pedido de Trabalho aberto até resolução da avaria.

Após a criação da OT, um Responsável de Trabalho, assignado pelo Responsável de Manutenção, verifica a existência dos materiais necessários à resolução do problema e a disponibilidade logística. Caso algum material necessário esteja indisponível é feita uma requisição para o mesmo e a OT fica suspensa até que o técnico reúna todos os materiais necessários à realização do trabalho. Caso não exista disponibilidade logística, ou seja, equipas de manutenção prontas ao envio até à infraestrutura, ou algum responsável que possa abrir as portas da infraestrutura de modo a iniciar os trabalhos é feito um agendamento até ambas as condições estarem reunidas ficando a OT em suspenso.

Após reunidas as condições logísticas e de disponibilidade de material, o técnico de manutenção confirma o diagnóstico do problema e efetua a reparação da falha reportada. Após verificação e confirmação de resolução da avaria, ao ensaiar o funcionamento do equipamento, o técnico preenche a ordem de trabalho que lhe foi fornecida entregando-a a um administrativo para que este a insira digitalmente em sistema ou o próprio técnico, caso possua credenciais válidas para o efeito, insere ele mesmo os dados em ambiente informático.

A OT é então dada como executada e o PT, que lhe deu origem, estando até então em espera, é novamente aberto para que o seu requisitante avalie a intervenção efetuada visando a sua aprovação e encerrando assim o PT. Após confirmação de fecho do PT, a OT é também ela fechada e o processo de manutenção é concluído.

Uma outra possibilidade de fecho da OT existe sempre que um intervalo de tempo, determinado corporativamente, decorra sem que tenha sido efetuada a respetiva validação do PT.

4. Análise exploratória dos dados de manutenção

Após contextualização e enquadramento do Grupo AdP e todo o seu processo de manutenção torna-se então possível promover a análise dos dados fornecidos referentes a este processo por forma a identificar possíveis problemas a resolver.

O primeiro subcapítulo visa contextualizar o universo dos dados de manutenção corretiva disponibilizados. No segundo subcapítulo analisam-se os dados fornecidos apontando-lhes falhas na sua qualidade para estudo dos indicadores de fiabilidade. No terceiro subcapítulo é novamente analisada um conjunto de dados provenientes de nova extração nos quais se reconhecem qualidade para o propósito da dissertação e finalmente são listadas condições que permitam atingir esse objetivo.

4.1. Informação fornecida

De modo a perceber o panorama do estado da manutenção corretiva no Grupo AdP, a *Aquasis*, empresa fornecedora do programa *Software Aquaman* procedeu à extração de uma base de dados de manutenções corretivas efetuadas por cinco empresas do grupo. A escolha destas empresas teve em consideração a necessária autorização para acesso aos seus dados para posterior tratamento.

Como já mencionado, o Grupo passou por diversas agregações e cisões nos últimos anos, fator este, que motivou uma perda de histórico de manutenção por parte de algumas empresas envolvidas nestes processos.

Por esta razão, o histórico temporal observado na extração de dados em análise de cada empresa difere entre si, verificando-se discrepâncias evidentes no que toca ao número de ordens de trabalho transmitidas sendo as mais relevantes para efeitos de análise as empresas 00 e 04 pela dimensão dos dados, que representam cerca de 95% do total dos dados recebidos. São também estas as empresas que possuem um histórico de falhas mais completo em termos temporais.

Neste contexto, a Empresa 00 regista 11 177 OT corretivas num espaço de 20 meses enquanto que a empresa 04 expõe 12 981 OT corretivas durante 21 meses (Tabela 5).

Ao abrigo do acordo de confidencialidade celebrado, foi desenvolvida uma codificação dos nomes das empresas por forma a manter o seu anonimato.

Tabela 5 - Distribuição de OT fornecidas

Empresa	00	01	02	03	04	TOTAL
Nº OT [freq]	11 177	625	293	451	12 981	25 527
Tempo [meses]	20	10	9	4	21	-

Após extração dos dados do *software* de manutenção para ficheiro em formato Excel, procedeu-se à sua análise e organização da informação.

Em ambiente Excel cada linha corresponde a uma OT diferente e para cada coluna tem-se uma informação diferente relativamente à mesma (consultar anexo C), onde se destacam os seguintes campos:

- **OT** – Número interno de identificação da OT;
- **DESC OT** – Descrição da OT realizada;
- **COD LOCALIZACAO** – Código da Localização onde a OT foi aberta;
- **DESC LOCALIZACAO** – Descrição da localização onde a OT foi aberta;
- **EQUIPAMENTO** – Código do Equipamento (Ativo ou Componente) onde a OT foi aberta. Em caso de omissão indica que a OT foi preenchida com uma localização operacional de nível 6 e portanto, aberta, apenas à localização do Ativo;
- **ESTADO EQUIP** – Estado do Equipamento à data em que os dados foram retirados do software de manutenção;
- **NUMSERIE EQUIP** – Número de Inventário do Equipamento;
- **CLASSE EQUIP** – Classe do Equipamento;
- **SUBCLASSE EQUIP** – Subclasse do Equipamento;
- **DATA INSTALACAO EQUIP** – Data de Instalação do Equipamento;
- **RELATORIO AVARIA** – Relatório de Avaria registado na OT;
- **INICIO REAL** – Início Realização do Trabalho (correspondente à primeira data e hora de imputação de horas;
- **FIM REAL** – Fim Realização do Trabalho (correspondente à última data e hora de imputação de horas;
- **DATA REGISTO** – Data de entrada da OT no sistema;
- **DATA OCORRENCIA** – Data de observação da anomalia ou trabalho em condição deficiente;

Os resultados da análise aos campos disponibilizados são apresentados no capítulo seguinte.

4.2. Tratamento e Apresentação do Diagnóstico

De modo a obter uma perspetiva geral da situação da manutenção corretiva no Grupo procedeu-se à análise das 24 158 OT referentes às empresas 00 e 04 excluindo-se assim as empresas intermédias por carecerem de universo temporal e de dimensão de amostra, sem perda de significado ou desvirtuação dos resultados.

Sendo as infraestruturas, bem como as condições a que os equipamentos instalados nas mesmas se encontram sujeitos, dependentes da área de negócio é necessário perceber onde se encontra maior incidência das OT para deste modo ter-se uma idealização de que tipo de ações de mitigação de falha poderemos ter presentes (figura 28).

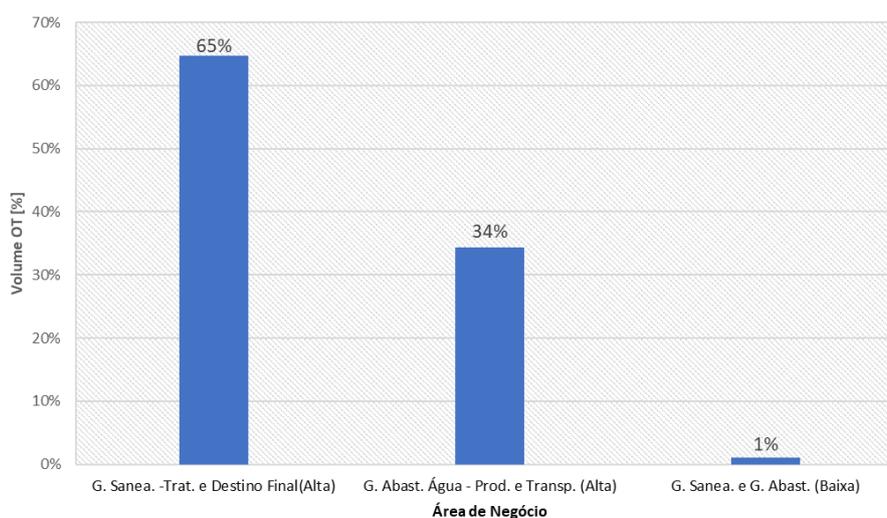


Figura 28 – Distribuição de OT por Áreas de Negócio

Verifica-se que o número de OT relativas a sistemas em Baixa é residual face à dimensão do número para sistemas em Alta. Nesta área de negócio, destacam-se as infraestruturas de saneamento como as mais recorrentes em termos de manutenções corretivas algo que se depreende pelo tipo de fluido de trabalho em causa.

Dada a baixa representatividade das Ordens de Trabalho relativas a sistemas em Baixa face à dimensão da amostra para sistemas em Alta, optou-se por não incluir no estudo os dados referentes à área de negócio em Baixa. Esta diferença na quantidade de dados pode ser explicada pela inúmera presenta de equipamentos nas ETA e ETAR, constituindo sistemas de abastecimento e saneamento em Alta, respetivamente, enquanto que os sistemas de distribuição em Baixa (geralmente condutas) têm como principal falha roturas pontuais.

Na figura 29, em baixo, é possível verificar uma diferença acentuada no número de OT alocadas ao saneamento relativamente ao abastecimento, sendo esta diferença numa razão de 3,5 : 1. Esta desigualdade pode ser explicada não só pelas condições a que as infraestruturas estão sujeitas num caso e no outro, como já referido, mas também pelo facto de existirem, na totalidade do Grupo, 992 ETAR contra a presença de 157 ETA (para cada ETA existem 6.3 ETAR) (tabela 4).

Destacam-se também os 20% referentes à classe “Outros”, onde se englobaram três tipologias que dada a sua representatividade para o grupo, não foram abordadas: barragens, reservatórios e monitorização.

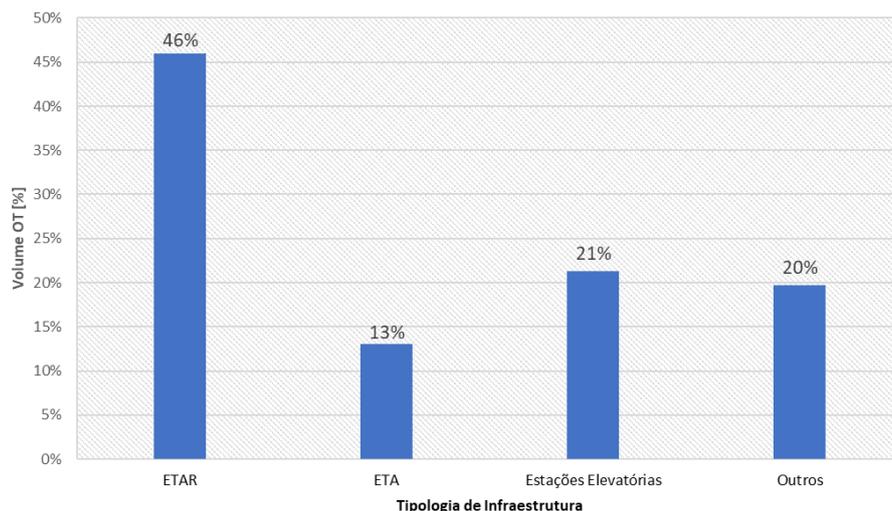


Figura 29 - Distribuição de OT por tipologia de Infraestrutura

Apesar dos dados revelarem um maior número de trabalhos em ETAR, número que se justifica pelas características do efluente a tratar e pela quantidade de equipamentos instalados, considerou-se que pela representatividade que as estações elevatórias têm para com o Grupo, 2719 EE para 992 ETAR (tabela 4) e por esta tipologia de infraestrutura fazer parte integrante no processo de tratamento de uma ETAR e ETA, dever-se-ia dedicar uma maior atenção a este tipo de infraestrutura.

Assim, analisou-se em maior pormenor a distribuição de OT em EE por área de negócio, podendo-se verificar os resultados na figura abaixo (figura 30).

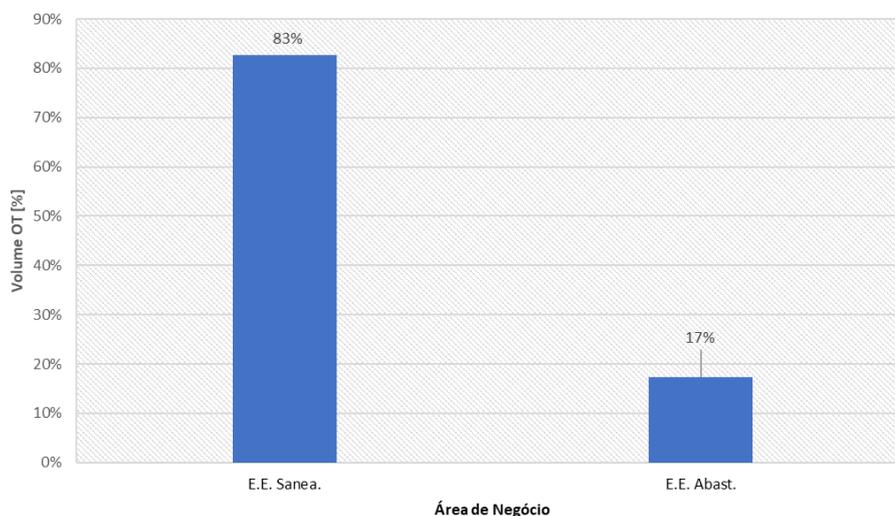


Figura 30 - Distribuição de OT por tipologia Estação Elevatória

Para efeitos de registo de PT é obrigatório o preenchimento do código de localização (figura 21) por parte do requisitante. De modo a percebermos de que modo é feito este preenchimento refletiu-se em gráfico as localizações operacionais existentes nas ordens de trabalho conseguindo-se assim identificar o nível de comprometimento da equipa aquando do processo de manutenção, ou seja, uma maior incidência de níveis 6 e 7, indicam que as OT são alocadas à infraestrutura onde o ativo se

encontra instalado, não havendo necessariamente a identificação de qual a localização do equipamento (Nível 8) ou qual o componente do equipamento (nível 9) necessita de intervenção (figura 31).

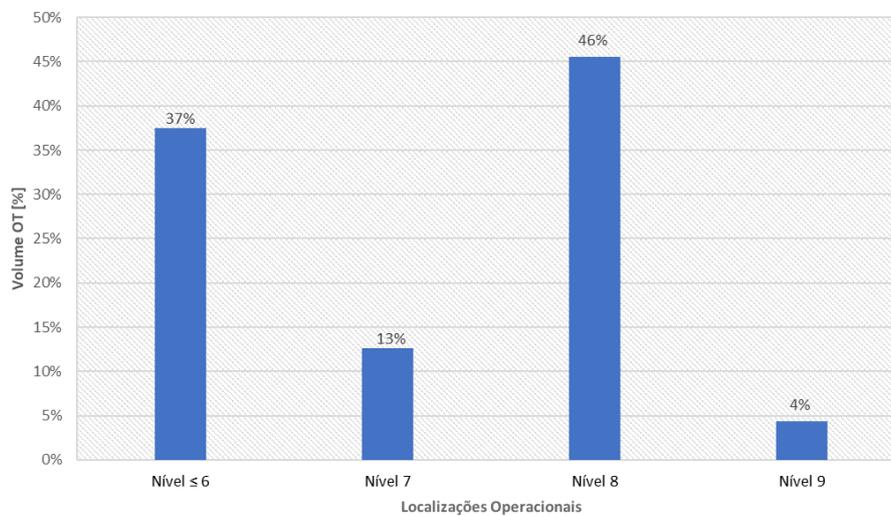


Figura 31 - Distribuição Localizações Operacionais no preenchimento de OT

Face aos dados refletidos na figura 31 verifica-se que cerca de 50% das OT não permitem alocar um evento de manutenção corretiva a um determinado equipamento ou componente, pelo que o rastreio às manutenções ocorridas ao equipamento ficam comprometidas, impossibilitando assim o cálculo de indicadores de fiabilidade que atuariam como indicadores de *performance*.

O facto dos dados refletirem avarias associadas a localizações operacionais de níveis 6 e 7 impossibilita a criação de um histórico de avarias, ao equipamento, uma vez que os MTBF obtidos seriam incorretos, pois refletiriam o intervalo de tempo decorrido entre duas OT com o mesmo código de localização, no entanto, não era garantido que pelo meio não se tivesse procedido a uma intervenção nesse mesmo equipamento, que, no entanto, teria sido reportada apenas ao nível 6.

Uma forma de eliminar este constrangimento seria a utilização do Código de Equipamento aquando da realização de uma OT que estivesse associada a uma localização funcional de nível 6. No entanto, verifica-se que apenas 0.4% das OT alocadas ao nível 6, apresentam o Código de Equipamento preenchido, pelo que, o ganho com o preenchimento deste campo é residual e não reflete qualquer melhoria no estado de diagnóstico da informação.

Após feito o diagnóstico relativo ao registo do processo de manutenção considerou-se pertinente a análise da eficiência o processo de manutenção em si, pelos operadores, tendo-se, para o efeito analisado os tempos médios de reparação através dos campos "Início Real" e "Fim Real" (figura 32).

Durante esta análise, verificou-se que um número considerável de ordens de trabalho possuem intervalos de tempo entre abertura e fecho da OT inferiores a 1 minuto, não tendo sido considerados estes dados na análise por não refletirem a realidade de horas imputadas ao serviço.

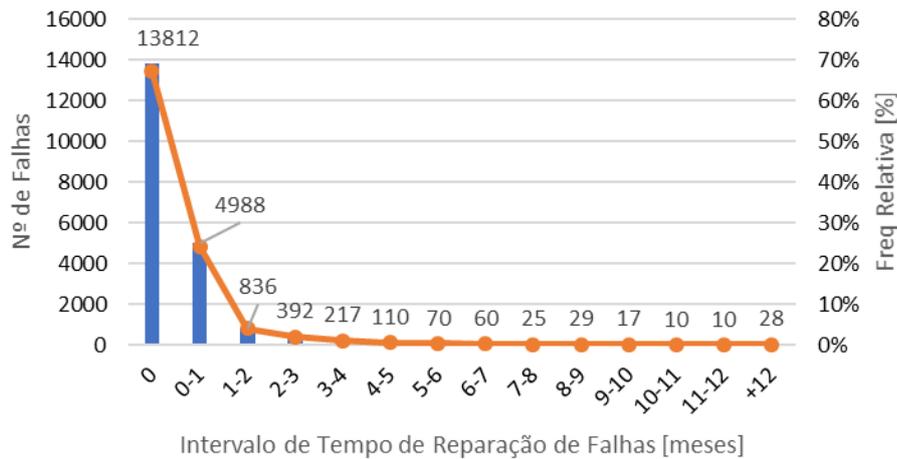


Figura 32 - Distribuição do Intervalo de Tempo de Reparação de Falhas em Meses

Na figura 32, é possível verificar que a maior percentagem de falhas (67%) tem uma reparação inferior a um dia de calendário e 24% das reparações tem duração inferior a 1 mês, verificando uma diminuição do número de reparações com tempos de reparação mais demorados. Este tipo de informação torna-se relevante porque permite identificar o tipo predominante de manutenção efetuado no grupo (se substituição – componentes rotáveis ou de melhoria), que neste caso se verifica ser de melhoria dado a maior parte dos componentes serem reparados no mesmo dia útil em que falharam.

De modo a perceber que tipos de intervenção ocorrem no processo, decidiu-se verificar quantas horas eram imputadas à OT, necessárias à reparação da Falha reportada na OT, tendo os dados sido refletidos na figura 33.

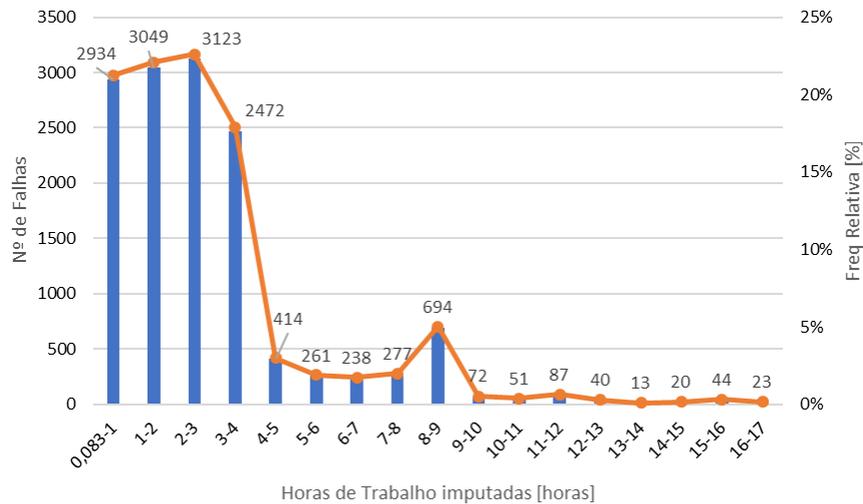


Figura 33 - Distribuição Tempo médio de Reparação de Falhas em horas

Através desta figura, é possível evidenciar que a maior parte das reparações (84%) têm durações inferiores a 4 horas, sendo as restantes 16% das intervenções espaçadas numa gama de intervalos até à duração máxima de 17 horas, o que sugere um nível de disponibilidade elevado dada a prontidão na restituição das condições operacionais.

O facto de se verificarem debilidades nos dados analisados, impossibilitou o estudo previsto nas intervenções de manutenção corretiva. Assim optou-se, em conjunto com a equipa do Grupo AdP, por uma abordagem diferente, desta forma, promovendo o desenvolvimento de um estudo de fiabilidade e disponibilidade a uma infraestrutura, tendo sido selecionada a Estação Elevatória do Jamor pela sua dimensão, complexidade e representatividade deste tipo de infraestruturas no seio do Grupo.

Foi então realizada uma nova extração de dados, por forma a possibilitar o desenvolvimento do novo estudo proposto.

4.3. Análise de dados da Estação Elevatória Jamor

Desde o ano da sua construção a EE do Jamor passou pela gestão operacional de 3 empresas diferentes, resultado dos processos de reestruturação ao nível de empresas (agregações e cisões) no Grupo AdP, encontrando-se atualmente gerida pelas Águas do Tejo Atlântico - AdTA. No entanto, ao longo de todas estas etapas, o histórico de avarias associado à infraestrutura foi guardado e transferido para a base de dados da atual empresa responsável pela EE, permitindo assim um histórico de avarias com um universo temporal de 114 meses (janeiro de 2010 a junho de 2018) e 350 OT corretivas todas elas preenchidas ao nível 8.

A fim de verificar a existência de uma tendência de falhas para uma dada classe de equipamentos em específico, que permitisse identificar qual (ou quais) a mais recorrente em termos de avaria procedeu-se à análise do código de localização do equipamento, tendo-se distribuído as OT por classes como se evidencia na figura 34. Após identificar as classes de equipamentos críticas é então necessário perceber o porquê destes equipamentos avariarem e finalmente adotar medidas corretivas, constituindo assim esta distribuição o passo inicial no processo de melhoria.

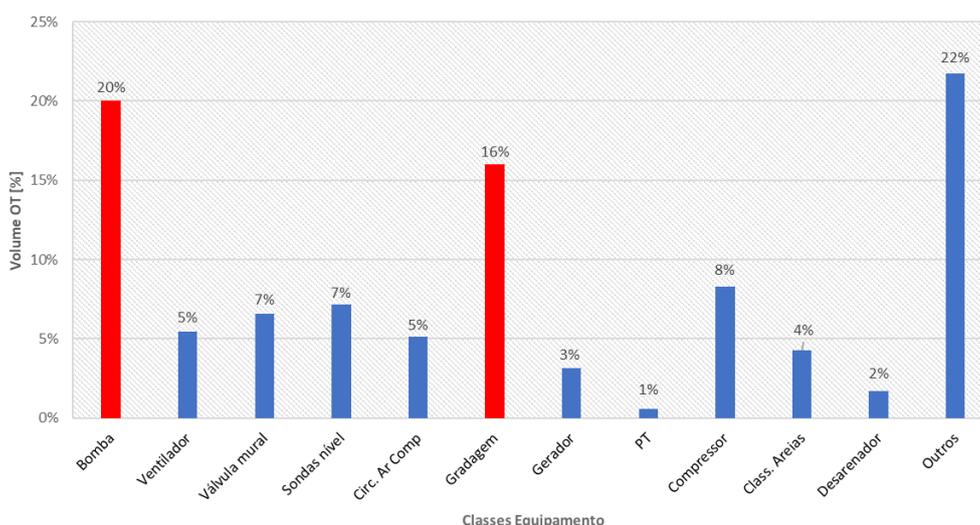


Figura 34 - Distribuição OT por classes de equipamento

Verifica-se que as classes com maior representatividade em número de falhas são as classes “Bomba” e “Gradagem” explicado face à quantidade de componentes que estes equipamentos têm bem

como as condições bastante adversas a que os mesmos estão sujeitos em serviço (dadas as características do efluente residual a elevar).

Apresentando incidências substancialmente menores face às classes anteriores encontram-se os equipamentos que não lidam diretamente com o fluido de trabalho, como é o caso do desarenador e classificador de areias (que apesar de contactarem com as águas residuais, estas, quando chegam a estes equipamentos já sofreram um processo de tratamento primário – gradagem – que lhes removeu a maior parte dos resíduos causadores das complicações operacionais mais representativas). Também a válvula mural tem contacto direto com o fluido, no entanto, esta é composta por guias em aço carbono, robustas e resistentes, estando os componentes mais frágeis, como o obturador (corpo da válvula mural) e atuador pneumático, isolados do caudal de chegada. O obturador porque as válvulas estão normalmente abertas e o atuador pneumático porque fisicamente nunca contacta com o efluente, explicando-se assim a baixa incidência de manutenções nesta classe de equipamentos.

Destacam-se aqueles equipamentos que não possuem qualquer contacto com o caudal como é o caso das condutas de ar comprimido, o compressor, o ventilador e condutas de ventilação (responsáveis pela renovação do ar no interior da infraestrutura), o Posto de transformação e o gerador de emergência. Nesta tipologia de equipamentos as ordens de manutenção corretivas são associadas essencialmente a fenómenos de desgaste de material ao longo do tempo.

Finalmente explicita-se a classe “Outros” onde se englobaram as OT referentes a estruturas e instalações elétricas, ou seja, beneficiações da infraestrutura como reparações de portas, muros e vedações bem como intervenções em lâmpada, tomadas e circuitos elétricos.

Dado que os dados apenas se encontravam preenchidos ao nível 8, não foi possível identificar quais os componentes do equipamento (para tal seria necessária uma catalogação ao nível 9) que exigiam ações de manutenção, como tal, procedeu-se à análise do campo “Descrição de OT” e “Descrição de Localização” de modo a identificar quais esses componentes de modo a facilitar a criação de um sistema que permitisse os cálculos fiabilísticos.

4.4. Problema a Analisar

O Grupo AdP possui um inventário de equipamentos com grande importância na gestão de ativos em serviço nas suas áreas de negócio. Como tal, urge a necessidade de garantir uma correta manutenção desses ativos de modo a maximizar a disponibilidade dos serviços prestados à população.

Reconhecendo que, atualmente, o Grupo não dispõe de qualquer ferramenta que possibilite a verificação rápida e imediata do nível de disponibilidade e fiabilidade das suas infraestruturas, considerou-se neste estudo o desenvolvimento de um projeto piloto que permitisse ao grupo, em tempo real, aceder a esta disponibilidade e conseqüentemente à qualidade de prestação dos seus serviços. Este estudo será desenvolvido por forma a permitir uma integração imediata nesta infraestrutura e adaptável para as restantes tipologias de EE num universo mais próximo e a todas as restantes infraestruturas do Grupo posteriormente.

Para a sua concretização, é, no entanto, necessário a reunião de determinadas condições:

- Determinar de forma inequívoca quais os equipamentos (e seus componentes) que falham.
- Obter o tempo médio entre falhas dos equipamentos (e seus componentes) como medida da eficácia do processo de manutenção.
- Obter o tempo médio de reparação dos equipamentos (e seus componentes) como medida da eficiência do processo de manutenção.
- Identificar o tempo de funcionamento desses equipamentos.

Para além do diagnóstico da situação operacional é também importante um plano de mitigação de falhas que permita aumentar tanto a fiabilidade como a disponibilidade dos equipamentos, devendo este ser dinâmico e despoletado, com base na monitorização do andamento da curva de fiabilidade, assim que se atinga um valor de fiabilidade considerado crítico.

5. Caso de estudo - Projeto Piloto

Por se verificar um direcionamento dos dados de manutenção disponíveis no *software* de gestão da manutenção para controlo de custos descorando a monitorização dos níveis de operacionalidade das infraestruturas e dos equipamentos decidiu-se desenvolver uma metodologia através de um projeto piloto por forma a permitir uma análise fiabilística e a retirar indicadores de fiabilidade que pudessem refletir o nível operacional da empresa. Para a sua concretização foi escolhida uma estação elevatória, neste caso a Estação Elevatória do Jamor, devido à sua representatividade para o Grupo, quer pelo número de infraestruturas existentes quer pela tipologia de equipamentos que tipicamente integra (e.g. Grupos eletrobomba), sendo objetivo final alargar a implementação a outras infraestruturas do grupo.

Este projeto piloto assenta na aplicação de uma análise *RAM – Reliability, Availability and Maintenance*, sendo que, para tal, começa-se com a caracterização da EE do Jamor onde se identificam e definem os processos existentes que servem como input para uma análise funcional do sistema. Desta análise funcional destacam-se certos equipamentos para os quais se desenvolve uma análise *FMECA – Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* bem como um diagrama de Árvore de Falha, justificando-se este último pelo facto de a falha dos equipamentos *per si* não causarem a falha do sistema, mas antes uma simultaneidade de falhas de equipamentos. Com estes equipamentos pode-se obter um gráfico de “frequência Vs severidade” que servirá de base ao *RBD – Reliability Block Diagram* de onde se retirarão os indicadores de fiabilidade da Estação Elevatória.

5.1. Estação Elevatória Jamor

O sistema de saneamento onde a EE do Jamor se encontra inserida faz a recolha e tratamento de águas residuais de quatro concelhos da região de Lisboa: Cascais, Sintra, Oeiras e Amadora através de uma rede de 144 quilómetros de extensão de coletores que garantem a chegada do fluido ao intercetor geral e às 9 estações elevatórias espalhadas ao longo da costa (Campo Hípico, Vinhas, Monte Estoril, São Pedro, Carcavelos, Laje, Paço d’Arcos, Barcarena e Jamor) que bombeiam as águas residuais recolhidas a cotas abaixo da cota do intercetor geral (figura 35).

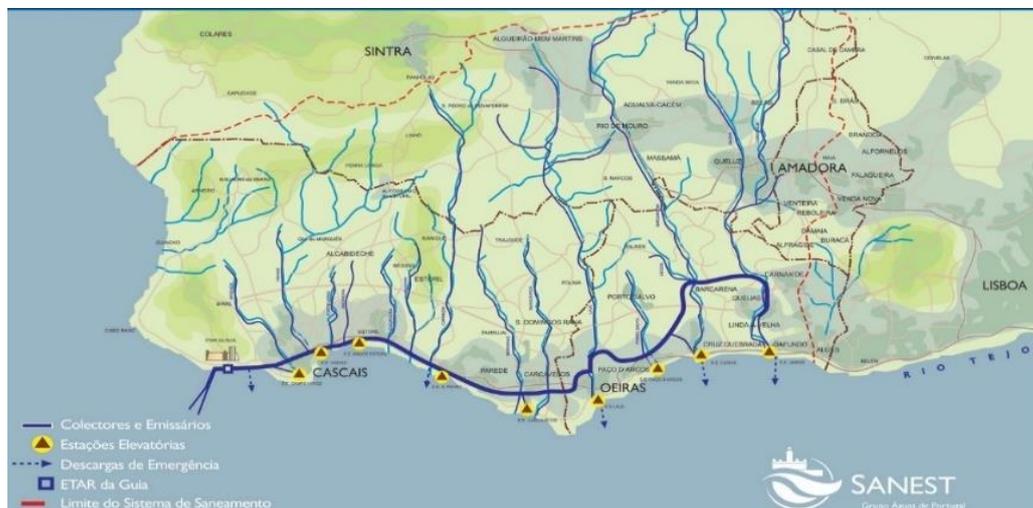


Figura 35 - Sistema de Saneamento da Costa do Estoril

A Estação Elevatória do Jamor encontra-se em funcionamento desde Abril de 1998, tendo sofrido uma reabilitação ao grupo eletrobomba em 2016. Esta EE eleva as águas residuais recebidas da zona baixa da ribeira do Jamor e da convergência do complexo fabril da Cruz Quebrada com o Estádio Nacional e Ribeira de Junça até ao interceptor geral (onde se mistura com as águas provenientes dos restantes coletores gravíticos) e percorre uma distância de 25 km, sob escoamento gravítico (comprimento do interceptor – representado a azul na figura 35), até chegar à ETAR da Guia, em Cascais.

Ao chegar à Estação Elevatória, através das condutas de chegada, as águas residuais encontram uma zona com *by-pass* de segurança que consiste numa caixa de entrada (nomenclatura dada às estruturas tipo tanque que armazenam o caudal de chegada) equipada com 3 válvulas de mural com acionamento por atuador pneumático de duplo efeito. Duas delas permitem o acesso do fluido à infraestrutura sendo que a restante garante o *by-pass* aquando da afluência de um fluxo anormal potenciador de situação de cheias. Nesta situação, dá-se a abertura da válvula de *by-pass*, procedendo-se à descarga pelo emissário submarino a 400 metros da linha da costa.

Na planta da estação elevatória (apresentada no Anexo D) podem-se verificar os 3 principais processos da Estação Elevatória:

- **Tamisação:** Duas linhas dispostas em paralelo recebem o efluente proveniente da caixa de entrada. Nesta fase é feita uma tamisação, procedendo à retenção das impurezas de maiores dimensões, através de um tambor mecânico rotativo com espaçamento entre barras de 10 mm e pente de limpeza para remoção de sólidos retidos pelos dentes do tamisador – figura 36, sendo posteriormente transportadas por um parafuso tipo Arquimedes até uma zona de desidratação, responsável pela compactação dos resíduos, garantido assim um transporte eficiente de resíduos dentro do contentor (figura 37).



Figura 36 - Pormenor Grelha do tamisador



Figura 37 - Tamisador

- **Desarenação:** Recebe o caudal proveniente da etapa de tamisação. Consiste num tanque troncocónico (desarenador) onde se promove uma redução de velocidade do efluente e consequente deposição, por sedimentação, das areias mais no fundo do órgão. Existe um misturador com a função de garantir que elementos como gorduras, beatas ou pequenos detritos, sejam libertados e separados das areias, no entanto, por não se verificar necessário

o seu funcionamento, encontra-se fora de serviço. Nesta etapa existe um compressor *Air-Lift* que, através de uma diferença de pressão, transporta as areias depositadas no desarenador para o classificador de areias. Neste equipamento é promovida a deposição das areias na parte inferior, sendo elevadas e separadas do fluido por um parafuso Arquimedes e o líquido filtrado novamente introduzido na etapa de tamisagem (fluxo representado pelas setas a amarelo na figura 38).



Figura 38 - Etapa de classificador de Areias e recirculação nos tamisadores

- **Bombagem:** Após a remoção de areias feita na etapa anterior o efluente é encaminhado para um poço onde uma configuração de 2 bombas ativas com 1 de reserva é mantida (figura 39). Cada bomba encontra-se ligada individualmente a um quadro elétrico com conta-horas e possui um variador de frequência, adaptando assim a sua velocidade às reais necessidades de elevação. Imediatamente antes da ligação à conduta de elevação encontra-se uma válvula de seccionamento de caudal (representada a castanho) e um pouco mais atrás (elemento a azul) uma válvula de não retorno que tem como função impedir que o efluente elevado não retorne para o poço pela bomba que não se encontra em funcionamento. A conexão desta peça à bomba é feita pela conduta de compressão.



Figura 39 - Bombas Estação Elevatória

5.2. Análise Funcional

Com a contextualização do modo de funcionamento da Estação Elevatória possibilita-se a análise funcional onde se pretende identificar todas as funções necessárias ao cumprimento dos requisitos operacionais por parte do sistema, bem como a identificação dos componentes principais associados a essas mesmas funções. É através da identificação destas funções, que será possível efetuar uma análise de modos de falha reconhecendo a perda de funcionalidade das mesmas.

Sendo a elevação das águas residuais até ao interceptor geral a principal função destacaram-se 12 subfunções que articuladas entre si garantem o cumprimento da função-mãe, a elevação das águas residuais até ao interceptor geral (Anexo E):

- **Controlar caudal de entrada na estação elevatória:** Este controlo é conseguido através de duas válvulas mural dispostas em paralelo cujo movimento é assegurado por um quadro válvula de comando que alimenta um atuador pneumático de duplo efeito. Ao longo das guias existem sensores de posição que permitem identificar a posição que a válvula mural ocupa (aberta, aberta a 2/3, aberta a 1/3 e fechada).
- **Remover sólidos:** A remoção de sólidos é assegurada por dois tamisadores dispostos em paralelo, com dualidade de funcionamento: automático (limpeza de 15 em 15 min) ou por acionamento das sondas de nível. Nesta etapa destacam-se os seguintes equipamentos:
 - Grelha do Tamisador – responsável pelo barramento à passagem dos sólidos
 - Parafuso de Elevação do Tamisador – ao elevar os resíduos retidos na grelha desobstrui a passagem da água evitando subidas de nível de água na linha de pré-tratamento.
 - Caixa redutora “motor-parafuso elevação” – desmultiplica as rotações do motor elétrico garantindo o movimento do parafuso de elevação.
 - Motor elétrico - fornece energia mecânica ao parafuso de elevação.
 - Quadro elétrico – fornece energia elétrica ao motor elétrico.
- **Controlar caudal nas linhas de pré-tratamento:** O controlo do caudal nas linhas de pré-tratamento é assegurado pelas sondas de nível da linha de pré-tratamento situadas a montante e a jusante do tamisador que ao verificarem um diferencial de pressão vão dar sinal para que o movimento do tamisador seja iniciado de modo a desobstruir o canal.
- **Isolar caudal dos equipamentos:** Quando é necessário efetuar alguma reparação na etapa de desarenação, ou seja, no agitador do desarenador, compressor *Air-Lift* ou no classificador de areias, torna-se necessário isolar o caudal destes equipamentos, sendo o mesmo enviado da linha de pré-tratamento diretamente para o poço de bombagem. É com este objetivo que existem as comportas manuais, tipo adufa. Enquanto uma é fechada impedindo a passagem ao órgão desarenador a outra é aberta permitindo a passagem diretamente para o poço de bombagem.
- **Remover areias:** esta função ganha especial relevo na medida em que é responsável pela melhoria das condições de trabalho às bombas ao remover gradados mais finos que passaram pela etapa de tamisagem. Para tal são necessários os seguintes equipamentos:

- Ponte raspadora – promove libertação de partículas mais leves que estão presas junto com as areias, ajudando a uma maior concentração e limpeza das areias a remover. Apesar deste equipamento estar desativado, por se ter revelado desnecessário para o processo, decidiu-se incluir no estudo uma vez que é pretendido que seja possível implementar esta metodologia em infraestruturas similares no seio do Grupo AdP.
 - Motor elétrico da ponte raspadora – Garante energia cinética à ponte raspadora.
 - Compressor *Air-Lift* – bombeia as areias até ao classificador.
 - Motor *Air-Lift* – Garante energia permitindo a rotação da pá do compressor.
 - Quadro elétrico compressor *Air-Lift* – Garante energia elétrica ao motor.
 - Parafuso classificador areias – responsável pela separação das areias da água a reentrar no processo pela linha de pré-tratamento.
 - Caixa redutora “motor-parafuso elevação” – desmultiplica as rotações do motor elétrico garantindo o movimento do parafuso de elevação.
 - Motor elétrico do classificador de areias – fornece energia mecânica ao parafuso de elevação.
 - Quadro elétrico do classificador de areias – fornece energia elétrica ao motor elétrico.
- **Monitorizar arranque dos equipamentos:** O arranque e a paragem dos equipamentos é de modo geral controlado pelo autómato (se a estação estiver em modo automático). No entanto, para além deste, existem:
 - Sondas de nível linha pré-tratamento – sondas de nível hidrostáticas que ao registarem uma determinada diferença de pressão acionam o funcionamento do tamisador caso este não se encontre já em funcionamento (pelo modo automático).
 - Variador de frequência bomba submersível – ajusta a velocidade da bomba mediante o caudal que será necessário enviar para a conduta de elevação e em função do nível do poço de elevação.
 - Sonda de nível máximo poço bombagem – assegura o arranque das bombas assim que o nível de água no poço atinge um valor crítico e dá ordem para o fecho das válvulas murais das linhas de pré-tratamento, bem como a abertura da válvula de *by-pass* à EE, revertendo o processo após normalização dos níveis.
 - Medidor de nível ultrassónico poço bombagem – mediante o nível de água no poço faz arrancar uma ou duas bombas em simultâneo.
 - **Garantir energia elétrica:** A energia elétrica necessária ao funcionamento da estação é geralmente assegurada pelo posto de transformação e quadro elétrico geral, de onde se ramificam os seguintes quadros elétricos parciais.
 - Quadro elétrico tamisador

- Quadro elétrico compressor *Air-Lift*
 - Quadro elétrico classificador de areias
 - Quadro elétrico compressor da rede ar comprimido
 - Quadro elétrico bomba submersível
- **Garantir energia elétrica em caso de falha do posto de transformação:** Em caso de falha do Posto de Transformação existe um gerador de emergência alimentado a diesel com uma autonomia de cerca de 8 horas (depósito de 240 l com consumo de 30l/h) que garante o funcionamento dos equipamentos neste intervalo.
 - **Garantir energia pneumática:** Tão importante quanto a energia elétrica uma vez que é através de atuadores pneumáticos que as válvulas de mural são atuadas permitindo que haja fluxo na estação elevatória. Nesta função há que destacar:
 - Atuadores pneumáticos das válvulas de mural das linhas de pré-tratamento e de *by-pass* – Cilindros pneumáticos de duplo efeito com movimentação controlada pelos quadros válvula de comando.
 - Quadros válvula de comando mural das linhas de pré-tratamento e de *by-pass* – recebem o ar do reservatório de ar comprimido e transmitem-no à haste do atuador pneumático através das válvulas de admissão de ar.
 - Compressores e reservatório pneumático – garantem o armazenamento e disponibilidade da pressão necessária à movimentação das válvulas murais.
 - **Garantir descargas de emergência:** As descargas de emergência têm como efeitos imediatos evitar a ocorrência de uma inundação de modo a salvaguardar os equipamentos, no entanto, todas as descargas necessitam de ser comunicadas à ERSAR e devido ao impacto ambiental e social que tem uma situação de descarga é de todo o interesse evitar que a mesma possa acontecer. As descargas ocorrem pelo emissário submarino através da abertura da válvula mural de *by-pass*. Destacam-se então os seguintes equipamentos:
 - Válvula mural *by-pass* à EE.
 - Atuador pneumático válvula mural *by-pass* à EE.
 - Quadro Válvula de comando mural *by-pass* à EE.

Dentro da estação elevatória caso as sondas de nível máximo sejam atingidas pelo nível de água ocorre fecho das válvulas de mural das linhas de pré-tratamento, abertura da válvula mural de *by-pass* (após atuação do sensor de fim de curso das comportas da linha) e consequente descarga. Assim realçam-se os seguintes equipamentos:

- Sondas de nível máximo linha pré-tratamento.
 - Sonda de nível máximo poço bombagem.
- **Garantir acesso de operação às instalações:** Devido ao tipo de fluido que é elevado surge a necessidade de ventilar a estrutura da EE de modo a diminuir a concentração dos maus cheiros e de certos gases que em concentrações elevadas podem ser nocivos. Sem uma correta ventilação e filtração do ar o operador não consegue permanecer dentro da estação

de modo a proceder a qualquer reparação de equipamento que seja necessária. Assim, destacam-se os seguintes equipamentos:

- Filtro carvão ativado – recebe o ar extraído da zona de trabalho pelo ventilador e realiza uma filtração (através de reagentes químicos) aos gases nocivos de modo a poder descarregar em segurança para a atmosfera fora do edifício.
 - Ventilador filtro carvão ativado – responsável pela extração do ar da zona de trabalho.
 - Ventilador de insuflação – responsável pela renovação de ar na zona de trabalho.
- **Controlar caudal no poço de bombagem:** Assegurado pelo funcionamento das sondas de nível do poço de bombagem e sondas de nível máximo do poço de bombagem que farão atuar os grupos eletrobomba mediante o nível de água.
 - **Elevar águas residuais provenientes do poço de bombagem:** Após receção das águas no poço de bombagem torna-se necessário que estas sejam enviadas até à conduta de elevação que faz a ligação da EE ao intercetor geral. Para tal são necessários os seguintes equipamentos:
 - Bomba submersível – Garantem a elevação do fluido presente no poço de bombagem.
 - Variador de frequência da bomba submersível – ajusta a velocidade da bomba mediante as necessidades de elevação de caudal
 - Quadro elétrico bomba submersível – fornece energia elétrica à bomba
 - Válvula de retenção – impede que o efluente elevado pela(s) bomba(s) anterior(es) retorne para o poço pela bomba em espera.
 - Válvula de seccionamento – permite isolar a linha de compressão de determinado grupo eletrobomba para intervenção na válvula de retenção, tubagem de elevação ou no próprio grupo eletrobomba.

Da análise descrita anteriormente pode-se verificar que apesar da tendência de existir um equipamento por função na EE existem certos equipamentos que desempenham mais do que uma função como o caso dos quadros elétricos, quadros válvula de comando ou as sondas de nível da linha de pré-tratamento e medidor de nível ultrassónico do poço de bombagem. Estes equipamentos tornam-se especialmente relevantes na medida em que a sua falha condiciona mais do que uma função requerendo por isso uma redobrada preocupação e atenção.

Garantindo o input necessário para uma análise *FMECA*, a análise funcional permitiu identificar as funções que serão alvo de análise por esta ferramenta bem como os elementos críticos responsáveis pelo desempenho dessas mesmas funções.

5.3. Análise FMECA

Tendo definidas as subfunções que garantem a função principal é então possível identificar os principais modos de falha associados às mesmas, ou seja, como é que a função deixa de ser realizada, as causas que levam à perda do cumprimento dessa função e quais as suas consequências para a infraestrutura e para o processo.

Procede-se então à classificação dos modos de falha em termos de severidade e frequência que serão utilizadas na matriz de criticidade que servirá à construção do diagrama de blocos.

Numa estação elevatória a falha ocorre sempre que não seja possível elevar o efluente, traduzindo-se numa descarga de emergência para o meio recetor ou numa inundação da EE. Sendo as bombas os equipamentos principais numa estação elevatória é de todo o interesse que estas trabalhem o maior tempo possível, sob as melhores condições possíveis, razão pela qual se considera que a estação funciona de modo deficiente quando o poço de bombagem recebe gradados (por falha nas etapas anteriores) que não tenham sido retidos na fase de pré-tratamento.

Doravante para os cálculos fiabilísticos considerar-se-á a utilização do termo falha, para a condição da falha (estação elevatória não elevar) e para o trabalhar em modo deficiente (e.g. poço de bombagem receber detritos).

Para melhor compreensão da perda de funcionalidade em cada subfunção apresenta-se o diagrama de *Ishikawa* onde cada espinha representa um determinado modo de falha (figura 40):

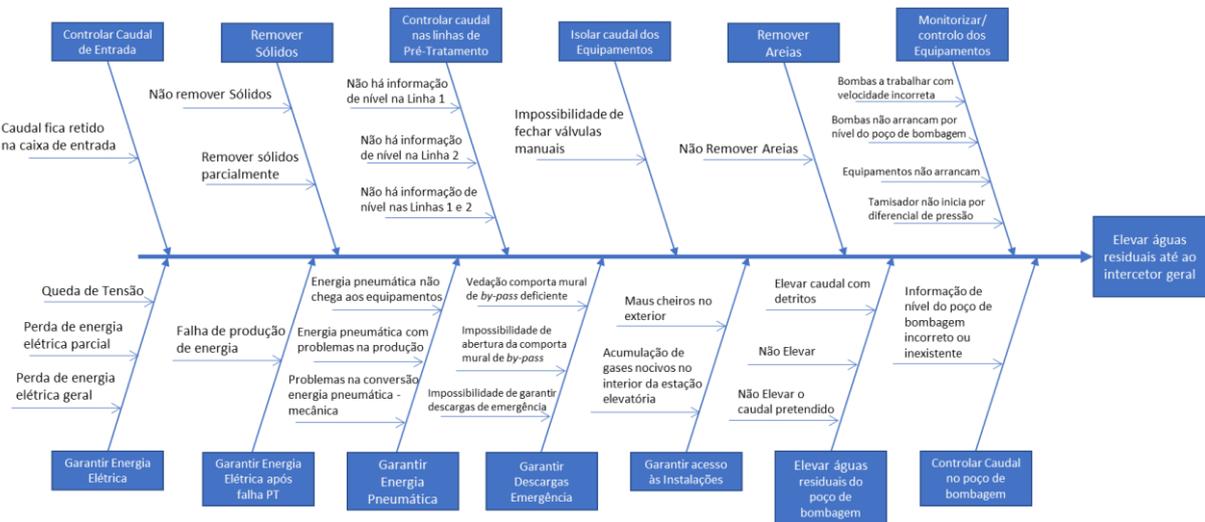


Figura 40 - Diagrama de Ishikawa modos de falha

Para o controlo do caudal de entrada na estação elevatória existe comprometimento sempre que haja impossibilidade de abertura das comportas de mural das linhas 1 e 2 de pré-tratamento.

A remoção de sólidos é inviabilizada sempre que uma falha no tamisador (ou em quaisquer dos seus componentes, não permitindo o seu funcionamento) ocorra podendo a perda de

funcionalidade de remoção ser parcial (furo na grelha do equipamento) ou total (entupimento da grelha do equipamento).

O controlo de nível de água na etapa de pré-tratamento é assegurada pelas sondas de nível dessa mesma linha podendo não haver informação na linha 1, 2 ou em ambas as linhas mediante avaria das sondas de nível da linha de pré-tratamento do(s) respetivo(s) canal(ais).

A impossibilidade de fecho das válvulas manuais, por vedação incorreta ou empeno das guias, origina uma perda de funcionalidade da função isolamento obrigando à descarga aquando de uma necessidade de reparação.

A não remoção de areias tem como repercussões o deterioramento das condições de trabalho das bombas podendo levar à sua falha e em última instância, uma falha na função principal.

A monitorização do funcionamento dos equipamentos é dado a dois níveis. Num nível inferior, existe a recolha de informação relativa às condições operacionais, onde se destacam, para o efeito, as sondas de nível da linha de pré-tratamento e o medidor de nível ultrassónico do poço de bombagem. Num nível superior, existe o processamento de toda a informação recolhida por estes sensores por parte do autómato que gera sinais que farão atuar os equipamentos de modo a repor os padrões operacionais (e.g. caudal excessivo no poço de bombagem – a informação do medidor de nível ultrassónico do poço é transmitida ao autómato que dá sinal para que a frequência da bomba seja aumentada através do variador de frequência, ou, se esta medida se verificar insuficiente, dar início ao funcionamento de uma segunda bomba).

Também a perda de energia elétrica pode ocorrer a dois níveis, geral ou parcial. A perda de energia elétrica geral está associada a dois acontecimentos: falha do quadro elétrico geral ou falha do posto de transformação e do gerador de emergência em simultâneo. A perda de energia parcial ocorre por falha dos quadros elétricos parciais dos equipamentos havendo comprometimento da fase operativa eletrizada pelos respetivos quadros. Destaca-se ainda a possibilidade de queda de tensão por aumento de temperatura do posto de transformação, prejudicando os equipamentos ao fornecer uma voltagem inadequada.

A energia pneumática, tal como a energia elétrica, tem grande importância no funcionamento de uma estação elevatória sendo esta energia necessária à movimentação das comportas mural. Assim, destacam-se três possíveis modos de falha ao nível da: produção (por falha dos compressores ou fuga no reservatório hidráulico), fornecimento e transformação em energia mecânica.

As descargas de emergência ocorrem sempre que um nível considerado crítico é atingido na estação elevatória servindo como uma proteção de inundação dos equipamentos. Esta função deixa de ser cumprida quando as sondas de nível máximo não dão sinal de atuação ou quando a comporta de *by-pass* não pode ser movimentada originando uma pressurização da conduta de chegada.

O acesso da operação às instalações é inviabilizado sempre que ocorra acumulação de sulfureto de hidrogénio originando um cheiro que impossibilita a permanência no interior da estação elevatória.

Já em cima se destacou a possibilidade de ocorrência de trabalho em condição deficiente, sendo esta considerada, para efeitos de estudo, como uma falha. Como tal, a subfunção elevar águas residuais do poço de bombagem deixa de ser cumprida aquando não só da não elevação ou elevação incorreta de caudal (abaixo do esperado) mas também quando a elevação ocorre com a presença de detritos.

O controlo do nível de caudal no poço de bombagem é importante na medida em que será através deste que o funcionamento das bombas é despoletado. Há uma perda desta funcionalidade sempre que a informação do nível de água no poço de bombagem for inexistente motivada por falha do medidor de nível ultrassónico do poço de bombagem.

A análise FMECA torna-se relevante na medida em que permite identificar de modo claro as causas que levam a uma perda de funcionalidade e quais as suas consequências. Ao definirem-se os modos como uma dada etapa perde a sua funcionalidade conseguem-se mais facilmente fornecer medidas de mitigação que se adequem ao processo e que possam ser adequadas não a uma, mas a várias funcionalidades em simultâneo (e.g. uma medida que originaria uma diminuição de falhas num equipamento, inserido em duas subfunções distintas).

5.4. Análise de Árvore de Falha

Dado que falhas isoladas de componentes não causam perda de funcionalidade da infraestrutura, mas antes, um conjunto de falhas a ocorrer em simultâneo considerou-se oportuna a realização de uma árvore de falha como complemento da análise *FMECA* de modo a assinalar e a expor estes acontecimentos. Através desta ferramenta é possível identificar claramente os conjuntos de falhas dos equipamentos (a ocorrer em simultâneo) que levam à falha da infraestrutura o que possibilita uma idealização de como será o diagrama de blocos caracterizador do sistema em termos de fiabilidade e disponibilidade.

Neste subcapítulo é feita uma abordagem *Top-Down* relativamente à situação de falha onde se consideram três situações de falha possíveis:

- **Descarga** – De modo a proteger os equipamentos de possíveis inundações ocorre uma descarga, sendo esta assegurada pelas válvulas de nível máximo da linha de pré-tratamento e do poço de bombagem.
- **Inundações** – Semelhante ao processo de descarga com a diferença que neste caso as sondas de nível máximo quer da linha de tamisagem quer do poço de bombagem falham e consequentemente não dão sinal de necessidade de descarga atingindo a água níveis críticos e acabando por transbordar dos canais.

- **Poço com gradados** – Sempre que ocorra uma falha no processo de tamisagem ou no processo de desarenamento, sendo que para este caso é feito um *by-pass* a esta etapa seguindo o caudal diretamente do tamisador para o poço de bombagem, resultando assim numa acumulação de areias ou outros elementos finos em suspensão no poço de bombagem.

5.4.1. Descarga

A descarga numa estação elevatória tem origem na combinação de falhas conjuntas de determinados equipamentos, da mesma etapa ou de etapas diferentes, de entre os quais se destacam as seguintes situações (podendo estas ser observadas na árvore de falha apresentada no Anexo F):

- **Descarga por nível excessivo no poço de bombagem** – falha dos grupos eletrobomba, medidor de nível ultrassónico ou variador de frequência gerando a descarga.
 - **Grupo Eletrobomba 1**
 - Bomba Submersível 1
 - Conduto de compressão 1
 - Zona de aspiração bomba 1
 - Variador de frequência 1
 - Quadro elétrico bomba 1
 - Autómato
 - **Grupo Eletrobomba 2**
 - Bomba Submersível 2
 - Conduto de compressão 2
 - Zona de aspiração bomba 2
 - Variador de frequência 2
 - Quadro elétrico bomba 2
 - Autómato
 - **Grupo Eletrobomba 3**
 - Bomba Submersível 3
 - Conduto de compressão 3
 - Zona de aspiração bomba 3
 - Variador de frequência 3
 - Quadro elétrico bomba 3
 - Autómato
 - **Medidor de nível ultrassónico**

Destaca-se a presença do autómato que é responsável pelo arranque da segunda e/ou terceira bomba mediante situações excecionais de carga de caudal de entrada. De facto, poderão acontecer situações em que, face ao caudal de entrada, o funcionamento de uma bomba seja insuficiente, havendo necessidade de descarga de modo a evitar uma inundação do poço de bombagem.

- **Descarga originada por falha das comportas de entrada** – como referido, sempre que ambos os sensores de posição, instalados nas guias das comportas de entrada da estação elevatória, sejam atuados no fim de curso de posição fechada, de forma automática é gerada ordem para abertura da válvula mural de *by-pass* possibilitando, deste modo, a descarga para o emissário submarino, evitando colocar o coletor de chegada (gravítico) em carga.
 - **Comporta de entrada Linha 1 Pré-Tratamento**
 - Atuador pneumático da válvula mural Linha 1 pré-tratamento
 - Quadro válvula de comando da válvula mural Linha 1 pré-tratamento
 - Válvula mural Linha 1 pré-tratamento
 - Sensor de posição da válvula de mural
 - **Comporta de entrada Linha 2 Pré-Tratamento**
 - Atuador pneumático da válvula mural Linha 2 pré-tratamento

- Quadro válvula de comando da válvula mural Linha 2 pré-tratamento
- Válvula mural Linha 2 pré-tratamento
- Sensor de posição da válvula de mural

Referenciou-se equipamento válvula de mural (figura 41) a toda a estrutura mecânica considerando como principais intervenções a reparação de pontos de corrosão e alinhamentos motivados pelo empeno do veio ou das guias onde assenta a estrutura devido à força exercida pelo caudal de chegada.



Figura 41 - Válvula mural de entrada com principais pontos de intervenção de manutenção

- **Descarga originada por nível excessivo nas linhas de pré-tratamento** – falha dos tamisadores e das sondas de nível havendo subida de nível e atuação das sondas de nível máximo.
 - **Tamisador 1**
 - Grelha do tamisador 1
 - Parafuso de elevação do tamisador 1
 - Caixa redutora do tamisador 1
 - Motor elétrico do tamisador 1
 - Quadro elétrico tamisador 1
 - Autómato
 - **Tamisador 2**
 - Grelha do tamisador 2
 - Parafuso de elevação do tamisador 2
 - Caixa redutora do tamisador 2
 - Motor elétrico do tamisador 2
 - Quadro elétrico tamisador 2
 - Autómato
 - **Sonda de nível Linha 1 pré-tratamento**
 - **Sonda de nível Linha 2 pré-tratamento**

Dados os dois modos de funcionamento dos tamisadores, uma falha da sonda de nível não inviabiliza à partida uma falha da etapa de pré-tratamento pois existe ainda a possibilidade dos tamisadores funcionarem em automático (desde que o intervalo de tempo entre atuações seja suficiente para evitar subidas excessivas de nível na linha). Neste caso a linha ficará a trabalhar em condição deficiente, no entanto, uma falha está dependente do caudal de entrada, que nesta dissertação se considerou ser o nominal (e suficiente para apenas uma linha) para efeitos de simplicidade de implementação da metodologia.

Um estudo às condições de falha será sugerido no capítulo “Trabalhos Futuros”.

- **Descarga originada por outros equipamentos** – onde se destacam as situações de perda de energia elétrica, provocando o fecho das comportas e paragem dos restantes equipamentos e perda de energia pneumática (atuadores ficam impedidos de movimentar as válvulas mural de entrada nas linhas de pré-tratamento).
 - **Posto de transformação**
 - **Gerador de emergência**
 - Motor diesel
 - Alternador
 - **Quadro elétrico geral**
 - **Circuitos hidráulicos**
 - **Reservatório de ar comprimido**
 - **Compressores da rede de ar comprimido**
 - **Guias da válvula mural de *by-pass***

Havendo uma falha no posto de transformação o gerador de emergência atua. Caso o gerador de emergência não arranque dá-se uma perda de energia elétrica e os equipamentos deixam de operar. À semelhança desta situação uma falha no quadro elétrico geral originará o mesmo resultado.

Sendo os compressores uma reserva ao reservatório de ar comprimido caso ocorra uma falha conjunta destes equipamentos os atuadores não funcionarão e conseqüentemente ocorrerá uma descarga. O mesmo resultado se obterá no caso de uma fuga do sistema de tubagens de ar comprimido.

É também necessário garantir uma correta vedação da válvula mural de *by-pass* pois caso contrário uma descarga contínua estaria a ocorrer.

5.4.2. Inundações e poço de bombagem recebe gradados

A situação de falha por inundações é em tudo similar falha “descarga originada pelo poço de bombagem” e “descarga originada pelas linhas de tratamento” (ver ponto 5.4.1) com a diferença que para que ocorra uma inundação serão necessárias as falhas descritas para as situações já mencionadas juntamente com a falha da sonda de nível máximo do poço de bombagem e das sondas de nível máximo das linhas 1 e 2 de pré-tratamento.

Também a acumulação de gradados no poço de bombagem se relaciona com a situação descrita no ponto anterior na medida em que a perda de funcionalidade das linhas de tamisagem permitem a passagem de gradados e juntamente com a perda de funcionalidade dos equipamentos responsáveis pelo desarenamento (*Air Lift* e Classificador de Areias) motivam o depósito de resíduos no poço de bombagem o que não causa uma perda de funcionalidade da estação mas potencia uma falha das bombas por entupimento da zona de aspiração.

Estas duas situações de falha não foram englobadas no estudo uma vez que o presente documento pretende demonstrar uma metodologia para implementação no processo de manutenção do Grupo sendo esta, uma replicação da utilizada na situação “descarga”.

5.5. Matriz de Criticidade

Tendo listados os equipamentos considerados críticos para o funcionamento da estrutura é então necessário proceder-se à criação de uma escala de severidade e frequência de falhas, S_i e Fr_i , respetivamente, que permita classificar uma falha como pouco crítica, crítica ou muito crítica de modo a definir uma importância aquando de medidas de mitigação de falha.

5.5.1. Definição de Escala de Frequência

Para a definição da escala de frequência consideraram-se 5 níveis sequenciais onde o primeiro nível, indicando a ocorrência de falha a cada 20 anos (7300 dias), seria o menos frequente e o quinto e último nível, evidenciando uma falha a cada seis meses (180 dias), indicaria o maior nível de risco operacional como se pode observar na tabela 6. A escolha de utilização de dias na tabela prende-se com o facto de se evitarem conversões entre cálculos potenciando o erro pois o MTBF de cada equipamento foi obtido nesta unidade. A escala de frequência foi elaborada pelo orientador de estágio e validada pelo Engenheiro responsável da manutenção no grupo Águas do Tejo Atlântico onde se insere a estação elevatória em questão.

Tabela 6 - Escala de Frequência matriz criticidade

Rank	Limite inferior [dias]	Limite superior [dias]
1	7300	100000
2	730	7300
3	360	730
4	180	365
5	0	180

A escala apresentada segue uma distribuição linear do quinto ao terceiro nível, sendo a passagem para o nível 1 acompanhada de uma tendência logarítmica. Esta tendência pode ser explicada pelo facto de se terem definido primeiramente os valores extremos (onde 5 representa uma falha que nunca se desenvolveu no período de atividade da estação elevatória e 1 indicará uma falha que seja recorrente no equipamento levando portanto a um maior esforço das equipas operacionais de

manutenção) e de seguida dar-se um peso maior às falhas mais frequentes em detrimento de falhas que ocorressem mais espaçadamente em termos temporais.

É ainda importante salientar que a escala se encontra definida para qualquer classe de ativos dentro da infraestrutura, não estando, portanto, alocada a nenhuma classe de ativo em específico.

5.5.2. Definição da Escala de Severidade

A criação da escala de severidade seguiu uma lógica um pouco diferente na medida em que se tratou da conjugação de três escalas de criticidade incidindo sobre três fatores distintos afetados por um determinado peso (equação 5.1). Desta forma consegue-se ter uma escala de criticidade mais abrangente que reflete não só as preocupações operacionais (tempo de reparação e influência do equipamento no processo) mas também as preocupações financeiras.

$$Severidade = 0.5 * Crit. Loc. + 0.25 * Custo Reparação + 0.25 * Tempo de Reparação$$

$$S_i = 0.5 * CL_i + 0.25 * C_i + 0.25 * T_i, \quad i \in [1, n_{equipamentos}] \quad (5.1)$$

A escolha do peso da criticidade de localização na função principal ser o dobro do peso do custo de reparação e do tempo de reparação deveu-se ao impacto social e ambiental que uma descarga de emergência tem e simultaneamente a imperatividade de cumprimento da regulamentação do setor de saneamento pela entidade responsável (ERSAR), sendo as restantes escalas um pouco mais flexíveis uma vez que não dependem da regulamentação de uma entidade externa.

A escala de tempo de reparação incide sobre o tempo médio de reparação de falha (MTTR) onde se pretende refletir a criticidade de o equipamento se encontrar inoperacional e a maneira como essa inoperacionalidade se reflete nas condições operacionais na estação elevatória nomeadamente na capacidade de reter caudal tanto nas linhas de funcionamento como na caixa de entrada (tabela 7).

Tabela 7 - Escala de Tempo de Reparação

<i>Rank</i>	Limite inferior [horas]	Limite superior [horas]
1	0	4
2	4	24
3	24	56
4	56	96
5	80	6000

A escala de custos espelha o modo de funcionamento interno da empresa em termos de aprovação de custos. Para custos maiores a validação necessária incorre em elementos mais importantes na cadeia organizacional do grupo, esperando-se, portanto, um maior tempo de espera (tabela 8).

Relativamente à escala de custos refletem-se as seguintes situações:

- **Nível 1** – pode ser aprovado diretamente pelo responsável de manutenção aquando da criação da ordem de trabalho.
- **Nível 2** – requer a aprovação do diretor de departamento
- **Nível 3** – requer concurso interno com convite a uma entidade fornecedora de serviços (Ajuste Direto com convite a 1 entidade com designação: AD-CV1)
- **Nível 4** - requer concurso interno com convite a três entidades fornecedoras de serviços (AD-CV3)
- **Nível 5** – requer concurso público sob plataforma “base.gov” sendo o tempo de espera geralmente de 4 a 6 meses.

Tabela 8 - Escala de Custo de Reparação

<i>Rank</i>	<i>Custo inferior [€]</i>	<i>Custo superior [€]</i>
1	0	1500
2	1500	5000
3	5000	20000
4	20000	75000
5	75000	1000000

Há ainda uma distinção em termos de reparações de equipamentos que é necessário clarificar. Existem reparações que levam obrigatoriamente ao fecho das comportas de entrada e consequente descarga (e.g. reparação das três bombas ou dos dois tamisadores em simultâneo), no entanto, outras reparações, de menor duração, podem não implicar o fecho das comportas (e.g. equipamentos da fase de desarenamento ou reparação de apenas uma bomba ou um tamisador caso o caudal de bombagem e de passagem, respetivamente, não sejam superiores à capacidade dos equipamentos) tomando assim uma menor importância relativamente a tempos de reparação, pelo facto de existir margem à subida de caudal.

Assim, surgiu a criação da escala de criticidade de localização do equipamento que traduz uma influência na concretização da função principal (tabela 9), onde se destacam os seguintes níveis:

Tabela 9 - Escala de Criticidade de Localização do equipamento na função principal

<i>Rank</i>	
1	Falha de equipamento não cria constrangimentos na etapa principal nem operacionais
2	Falha de equipamento não cria constrangimentos na etapa principal, mas cria constrangimento operacionais
3	Falha de equipamento cria constrangimentos na etapa principal sem reduzir a capacidade de transporte
4	Falha de equipamento cria constrangimentos na etapa principal e reduz a capacidade de transporte
5	Falha de equipamento impede o desenvolvimento da função principal

- **Nível 1** – reparações em estruturas como vedações ou portões de acesso, reparações de instalações elétricas e reparações de pequenas fugas de água potável em pontos de acesso.
- **Nível 2** – uma falha no sistema de desodorização gera uma atmosfera perigosa impossibilitando o acesso dos operadores aos equipamentos ou falha do sistema de

fornecimento de energia, o que origina que se tenha de alimentar o gerador de emergência com combustível.

- **Nível 3** – qualquer falha do sistema de desarenamento originará um défice de remoção de areias acumulando-se no poço de bombagem podendo a longo prazo causar entupimento.
- **Nível 4** – falha na tamisação (permitindo a passagem dos sólidos e possível entupimento – total ou parcial – da zona de aspiração da bomba).
- **Nível 5** – falhas que tornem a descarga eminente, tais como, falha das bombas, falha das válvulas mural de entrada e de *by-pass*, falha no sistema pneumático ou falha no gerador de emergência (após falha do Posto de transformação se o gerador de emergência falha a estação elevatória terá de descarregar).

De referir que no estudo em causa, relativamente às situações de nível 4 e 5 não se teve em conta a presença de equipamentos redundantes, ou seja, para cada equipamento foi dada uma classificação considerando que o mesmo atuava sozinho. Neste sentido uma margem de confiança nos resultados é ganha uma vez que se considera sempre o pior caso possível.

5.5.3. Cálculo da criticidade

Tendo os valores da severidade e frequência definidos para cada tipologia de falha dos equipamentos, podemos então passar ao cálculo da criticidade de modo a obter uma classificação individual que nos permita a quantificação da mesma, neste caso, “pouco crítica”, “crítica” ou “muito crítica”. A fórmula escolhida para a criticidade da falha foi:

$$\text{Criticidade} = \text{Severidade} * \text{Frequência}$$

$$K_i = S_i * F_i, \quad i \in [1, n_{\text{equipamentos}}] \quad (5.2)$$

A tipologia da criticidade estará diretamente relacionada com os índices de frequência e severidade uma vez que a sua definição irá depender do que se considerar mais preocupante em termos destas duas escalas.

Para a escala de frequência considerou-se crítico um equipamento que falhasse com uma periodicidade inferior a 2 anos, ou seja, níveis 3,4 e 5, tempo de garantia geralmente associado às reparações na indústria.

Uma vez que a paragem dos equipamentos gera situações de esforço tanto operacional (os equipamentos paralelos ficam em sobrecarga) como pessoal de manutenção pretende-se que esta seja a menor possível. Deste modo, definiu-se que a partir de um dia e meio de paragem de equipamento seria considerado crítico uma vez que a capacidade de retenção de caudal na estação elevatória ficaria comprometida, logo, os níveis 3,4 e 5 da escala de tempo de reparação seriam considerados críticos.

Como se explicou acima para maiores valores de custo de reparação também o tempo necessário à burocracia será maior atrasando assim o processo de reparação. Como tal, consideraram-

se como críticos os níveis 3,4 e 5, da escala de custo de reparação, dado o tempo de espera ser superior a uma semana, em contraste com os dois primeiros níveis que decorrem no máximo em 3 dias úteis.

Segundo a definição de falha considera-se que sempre que tenhamos a perda total ou parcial da funcionalidade do sistema incorremos em falha. Foi seguindo esta lógica de pensamento que se definiram os níveis 3, 4 e 5 como críticos.

Sendo a equação 5.1 dada por uma soma de pesos ponderados normalizados e sendo os níveis críticos todos iguais entre as escalas, verificamos que a escala de severidade será também ela crítica para os níveis 3,4 e 5.

Portanto, sabendo que os níveis 3, 4 e 5 serão críticos tanto na escala de severidade como na escala de frequência chegamos aos índices compreendidos entre 9 e 25 como índices críticos, no entanto, após validação experimental dos dados verificou-se que certas falhas, com classificações de 5, teriam de ser consideradas críticas tendo adotado a gama de valores descrita na tabela 10, que vai de encontro à classificação utilizada pela norma ferroviária.

Tendo definido o intervalo de índices de criticidade considerados críticos e muito críticos podemos então atribuir a escala de cor a estas duas classificações que se distinguem pela necessidade e tipo de medidas de mitigação de falha necessárias (tabela 10).

Tabela 10 - Escala de Criticidade

Nível de criticidade	Intervalo de valores	Esquema de cor
Pouco crítico	[1,5[Verde
Crítico	[5,13[Amarelo
Muito crítico	[13,25]	Vermelho

Através da análise dos dados fornecidos relativamente às OT na estação elevatória do Jamor foi possível chegar aos tempos médios de reparação para cada componente selecionado no caso de estudo tendo estes valores sido comparados com a escala de tempo de reparação (tabela 7) para obtenção de um determinado índice.

Para se avaliarem os custos imputados a cada ordem de trabalho foi necessária uma nova extração de dados em SAP-PM onde um custo médio associado a cada OT foi definido. Estes valores foram comparados com a tabela 8 e um índice foi atribuído.

Relativamente à criticidade de localização, foi preenchida manualmente, baseando-se nas consequências da falha na função principal (tabela 9) e tendo como suporte o diagrama de árvore de falha.

Após atribuição das classificações para estes três fatores foi possível definir os índices de severidade de cada falha de equipamento (anexo G).

Ainda da análise aos dados referentes à EE do Jamor, foi possível obter o tempo médio entre falhas e por comparação com a tabela 6 atribuir um determinado índice, definindo assim a frequência da falha.

Com estes dois parâmetros (severidade e frequência) foi então possível obter a criticidade de falha através da fórmula 5.2 – $K_i = S_i * F_i$ (Anexo H). Assim foi possível construir a seguinte matriz de criticidade (figura 42).

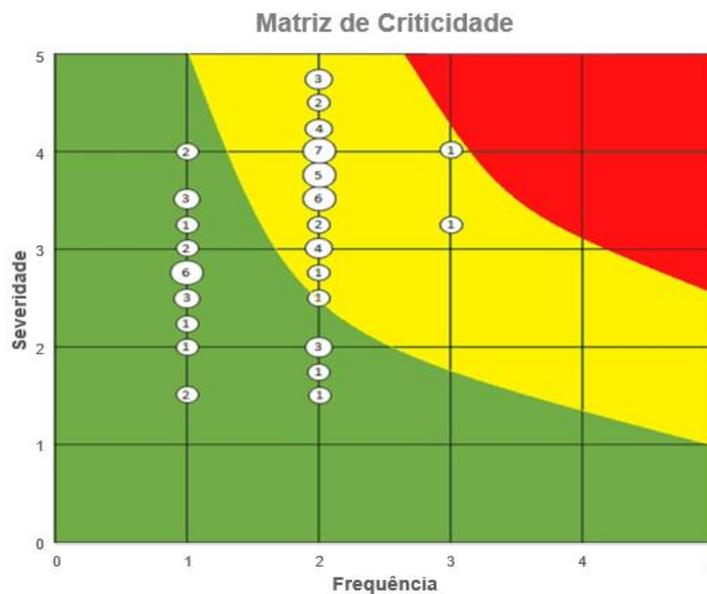


Figura 42 - Matriz de criticidade de falhas dos equipamentos

Relativamente aos dados espelhados do gráfico, escolheu-se a representação da classificação das falhas em termos de frequência absoluta de ocorrência por classificação de criticidade uma vez que existiam algumas classificações particulares (“severidade” 8 como produto de uma “frequência” 2 com uma “severidade” 4) com mais do que uma falha sendo importante dar ao leitor essa percepção através da representação de círculos cujo tamanho é dependente do número de ocorrências.

Como podemos evidenciar pelos dados refletidos na figura 42 cerca de metade dos equipamentos apresentam-se na zona amarela (37 equipamentos totalizando 58.7%) enquanto os restantes estão localizados na zona verde, não havendo lugar a classificações “muito críticas” na escala de falhas de equipamentos. De facto, é perceptível que a severidade ganha relevo face à frequência na medida em que 67% dos dados apresentam severidades superiores ou iguais ao nível 3 enquanto que apenas 3% dos dados apresenta classificações de frequência ao mesmo nível.

5.6. Diagrama de Blocos da Estrutura

Depois de se conhecerem os elementos críticos (zona amarela da figura 42) pela matriz de criticidade e recorrendo à árvore de falha anteriormente explicitada foi então possível conceber o

diagrama de blocos do sistema onde se consideram todas as possibilidades de falha que levam à perda de funcionalidade da estação elevatória.

O cálculo de fiabilidade do sistema trata-se de uma associação em série dos vários subsistemas correspondendo a uma determinada etapa (figura 43) sendo a fórmula dada por:



Figura 43 - Diagrama de blocos do sistema

$$R_{sistema} = R_A \cdot R_B \cdot R_C \cdot R_D \cdot R_E \quad (5.3)$$

Relembra-se que para cada um destes subsistemas foram apenas considerados os elementos críticos obtidos no ponto 5.5.3, sendo a numeração utilizada nas equações (5.4 e restantes) oriunda do anexo H.

Para o subsistema A – “comportas de entrada” teremos uma associação em paralelo refletindo a necessidade de ocorrência de dois acontecimentos em simultâneo para ocorrer falha da função.

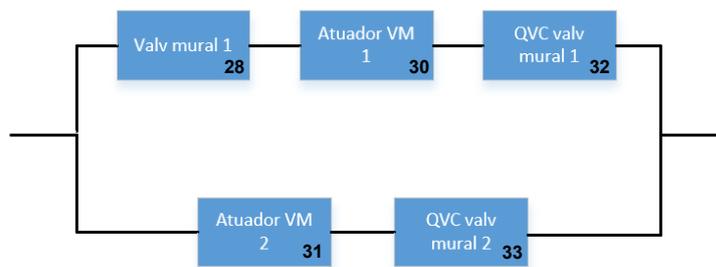


Figura 44 - Subsistema comportas entrada

$$R_1 = 1 - (1 - R_{28} - R_{30} \cdot R_{32}) \cdot (1 - R_{31} \cdot R_{33}) \quad (5.4)$$

Para o subsistema B – “Pré-Tratamento” destacam-se as possibilidades de falha do órgão tamisador e das sondas de nível das linhas que articuladas entre si motivam um aumento do nível na linha.



Figura 45 - Subsistema Linhas Pré-Tratamento

$$R_B = 1 - (1 - R_{10} \cdot R_{12} \cdot R_{16} \cdot R_{37}) \cdot (1 - R_{11} \cdot R_{13} \cdot R_{35}) \quad (5.5)$$

Para o subsistema C – “Bombagem” evidencia-se a possibilidade de falha dos três grupos em simultâneo como causa de descarga. Uma outra configuração poderia ser considerada, nomeadamente a possibilidade de falha de apenas uma bomba ou até mesmo de duas bombas, no entanto, para tal seria necessário a validação com uma análise de condições de falha – estudo que se reporta para trabalhos futuros.

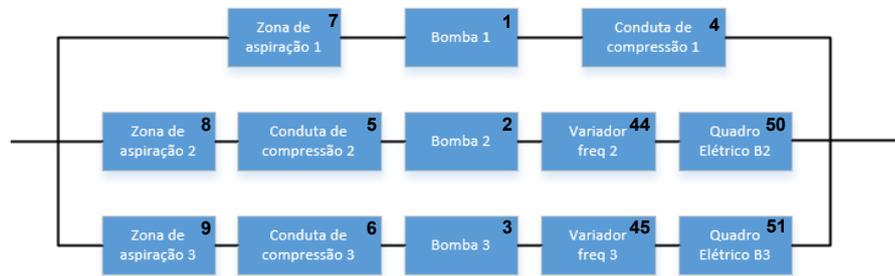


Figura 46 - Subsistema Bombagem

$$R_C = 1 - (1 - R_7 \cdot R_1 \cdot R_4) \cdot (1 - R_8 \cdot R_5 \cdot R_2 \cdot R_{44} \cdot R_{50}) \cdot (1 - R_9 \cdot R_6 \cdot R_3 \cdot R_{45} \cdot R_{51}) \quad (5.6)$$

Para o subsistema D e E – “Energia Elétrica” e “Energia pneumática”, respetivamente, destacam-se as possíveis fugas de ar comprimido que possam causar perda de potência ao veio do mecanismo acionador bem como problemas na reposição de pressão pneumática. Relativamente à energia elétrica, uma falha do quadro elétrico geral originaria paragem de toda a estação, o que também aconteceria com uma falha conjunta do posto de transformação e gerador de emergência (composto por uma associação série do alternador e motor diesel de combustão).

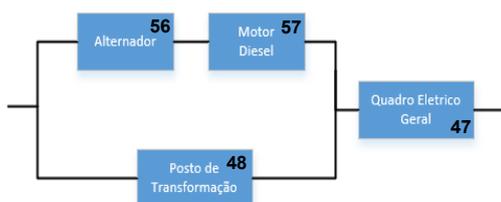


Figura 47 - Subsistema Energia Elétrica

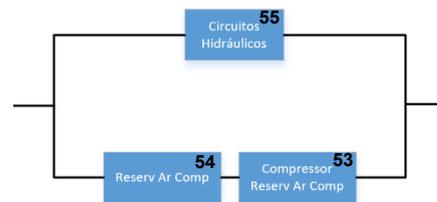


Figura 48 - Subsistema Energia Pneumática

$$R_D = (1 - (1 - R_{57} \cdot R_{56}) \cdot (1 - R_{48})) \cdot R_{47} \quad (5.7)$$

$$R_E = 1 - (1 - R_{55}) \cdot (1 - R_{54} \cdot R_{53}) \quad (5.8)$$

Para a obtenção da fiabilidade de cada equipamento foram necessários os tempos de funcionamento e a taxa de avarias individuais. Os primeiros foram obtidos essencialmente dos contadores instalados nos quadros elétricos, enquanto que os segundos resultaram do tratamento dos dados das OT relativas à estação elevatória do Jamor. Para cada componente o tempo de funcionamento (referente ao tempo cronológico de 242 meses, ou seja, 20 anos e 2 meses) e taxa de avarias encontram-se tabelados no Anexo I.

5.7. Fiabilidade e Disponibilidade

A distribuição exponencial negativa é uma distribuição de falhas característica de componentes em vida útil, sendo esta distribuição bastante utilizada face à sua simplicidade de cálculo. No âmbito desta dissertação considerou-se a distribuição exponencial negativa pela sua simplicidade e pelo facto dos dados de manutenção estarem direccionados para a aplicação deste modelo (com tempos médios de falhas isolados e tempos de funcionamento definidos).

Relembrando que a fiabilidade obtida se trata da probabilidade de um dado sistema ou equipamento estar em boas condições operacionais num determinado instante procedeu-se ao seu cálculo para o tempo de vida útil da instalação permitindo assim avaliar a evolução da fiabilidade do sistema. A representação gráfica dessa fiabilidade encontra-se representada na figura 49.

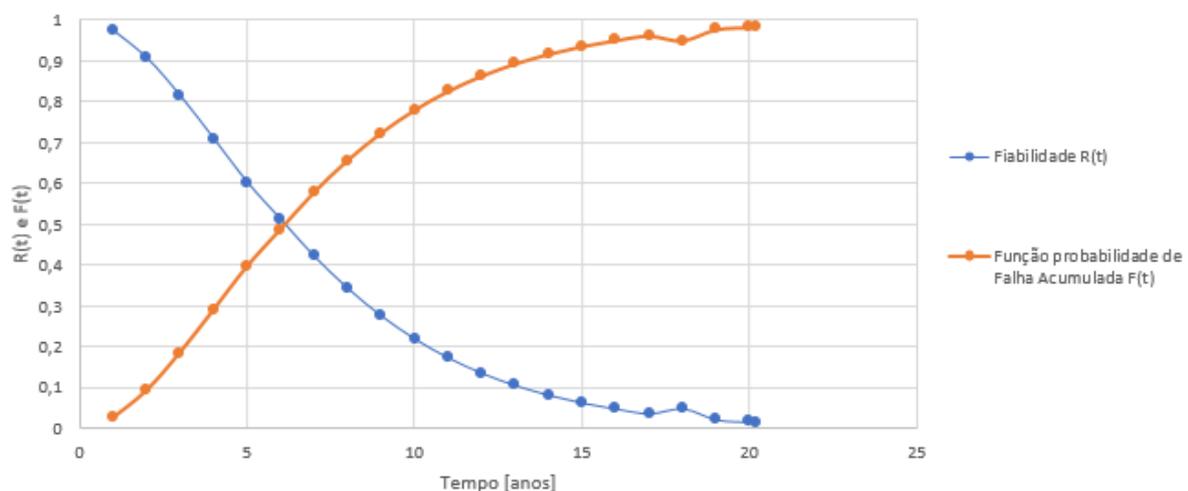


Figura 49 - Evolução da fiabilidade probabilidade de falha ao longo do tempo de funcionamento da instalação

Ao verificarmos a evolução do gráfico podemos concluir que como esperado a fiabilidade da estação elevatória decresce com o decorrer do tempo apresentando para o 6 ano de funcionamento o valor de 50%, o que indica que, neste instante, a probabilidade de sucesso ou falha é a mesma e a partir daqui passará o sistema a apresentar uma maior probabilidade de falha (o que motiva uma maior preocupação e antevê que este seja um período ideal para a realização de manutenção preventiva do sistema). É importante ainda destacar o aumento de fiabilidade decorrente da ação de reabilitação feita a todos os grupos bombagem no ano de 2016 (tendo esta reabilitação sido efetuada com os componentes disponíveis a nível operacional, a variação da taxa de avarias decorrente desta ação foi nula).

O estudo da fiabilidade foi feito, considerando os efeitos de *Duty Cycle*, ou seja, dado que os componentes não trabalhavam interruptamente, foi necessário considerar os tempos de funcionamento individuais fazendo uma proporção ao longo do tempo de estudo considerado, quer isto dizer que para um contador com 1500h de funcionamento, a fiabilidade desse equipamento no ano 20 foi calculada com base nas 1500h, no entanto, para o ano 10, apenas metade desse valor foi considerado e da mesma forma para o ano 5, um 1/4 do valor inicial foi utilizado ($1500/4 = 375$ horas).

O estudo da fiabilidade do sistema permite, monitorizar a tendência deste parâmetro afim de propor medidas corretivas que visam manter a fiabilidade acima de uma determinada condição como se verá no subcapítulo 5.9.

Relativamente à taxa de avarias do sistema, dado se considerar vida útil, esta será constante ao longo do tempo e dada pelas taxas de avarias de cada equipamento individualmente. Sabendo que num sistema série a taxa de avarias é dada pela soma das taxas médias dos vários equipamentos que o compõem é possível obter a taxa média de avarias da infraestrutura como a soma das taxas de cada etapa da mesma (figura 43).

Recordando as configurações dos diagramas de blocos (figuras 43 a 48) verifica-se que existem configurações série e paralelo que importa clarificar. Segundo [32] a taxa de avarias de um sistema paralelo composto por componentes iguais é uma função crescente no tempo que tende para o produto da taxa de avarias pelo número de equipamentos constituintes do sistema. Por os sistemas paralelos não serem constituídos por componentes com igual taxa de avarias, como aproximação considerou-se um valor médio das mesmas.

Considerando que um sistema paralelo é um caso particular do sistema do tipo “*m out of n*” tem-se que a taxa de avarias de um sistema paralelo é dada pelo produto do número de linhas (em paralelo) pela taxa de avarias média dessas linhas [32].

Assim e recorrendo às taxas de avarias obtidas (através do histórico fornecido) para cada equipamento (anexo I) foi possível chegar aos seguintes valores da tabela 11 (notação de acordo com a figura 43):

Tabela 11 - Taxa de Avarias para Infraestrutura

Etapa	A	B	C	D	E	Total
Taxa de Avarias [h^{-1}]	$5.07 \cdot 10^{-5}$	$1.63 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-4}$	$6.20 \cdot 10^{-5}$	$5.64 \cdot 10^{-5}$	$5.25 \cdot 10^{-4}$

O valor da taxa de avarias calculado sugere um MTBF para o sistema de 5.22 anos, valor este, semelhante aos 6 anos destacados na figura 49, podendo-se explicar a diferença entre estes valores pelas aproximações de cálculo efetuadas que, no entanto, não desvirtuam os resultados.

A monitorização da taxa de avarias torna-se bastante importante e vantajosa por através dela ser possível extrair um MTBF para o qual seria prudente a realização de intervenção nos equipamentos da estação de modo a prever a ocorrência de falha.

O cálculo da disponibilidade foi feito através das fórmulas 2.29 e 2.31. Para cada disponibilidade individual do componente foi considerada a fórmula 2.24, sendo esta aproximação válida mediante a condição de $MTTR \ll T_{operação}$, condição através da qual é possível caracterizar os eventos de manutenção corretiva como pontuais tal que a sobreposição de indisponibilidades entre dois ou mais equipamentos não se verifique.

Consultando o anexo I verificamos que cerca de 85% das falhas apresentam tempos operacionais e tempos de reparação (MTTR) com pelo menos duas ordens de grandeza de diferença o que legitima a utilização das fórmulas apresentadas anteriormente.

Recuperando a equação 2.24 verificamos que a disponibilidade de um sistema pode ser dada por um rácio de manutibilidade e fiabilidade, materializando-se estes parâmetros no MTTR e MTBF, respetivamente. Mediante a situação dos dados verificamos que a fiabilidade se destaca da manutibilidade ao apresentar valores de MTBF superiores no mínimo em uma ordem de grandeza comparativamente ao MTTR. Como tal, a disponibilidade do sistema será altamente influenciada pela fiabilidade e, conseqüentemente, pelo respetivo MTBF.

O primeiro passo foi o cálculo da disponibilidade considerando a lógica de cálculo na equação 5.3 agora aplicado às disponibilidades dos componentes, para tal foi utilizada a fórmula 2.24 pois era pretendido determinar a disponibilidade no instante correspondendo ao final da missão que neste caso foi considerado as 242 semanas, ou seja, aproximadamente 20 anos, tendo-se obtido um valor de $A(t) = 0.98132$ (tabela 12), o que significa que durante a missão a estação elevatória apenas não cumpriu a sua função durante aproximadamente 5 semanas.

Tabela 12 - Disponibilidade da Infraestrutura

Etapa	A	B	C	D	E	Total
Disponibilidade	0.(9) ₄ 8890	0.(9) ₈ 4	0.(9) ₄ 1269	0.(9) ₅ 2051	0.(9) ₅ 7545	0.98132

De seguida pretendeu-se verificar qual seria a evolução da disponibilidade ao longo do tempo recorrendo para tal à equação 2.26, no entanto, por constatação da desigualdade $MTTR \ll MTBF \ll T_{operação} = t$ verificamos duas situações:

- O primeiro termo da função da disponibilidade vem $\frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \approx MTBF$
- O segundo termo da função disponibilidade vem aproximadamente zero devido ao comportamento assintótico da função exponencial negativa que tende para zero para valores de t bastante elevados.

Assim sendo, para infraestruturas em funcionamento, cujos tempos operacionais sejam elevados e bastante superiores aos tempos de reparação, a disponibilidade apenas varia com o MTBF do sistema, que, para a análise em questão foi considerado constante, no entanto, com a implementação do Sistema de Inventariação de Ativos - SIA e com os dados do SCADA estes valores seriam calculados e apresentados ao instante (ver capítulo 3.3).

5.8. Sistema de aquisição de dados

Para a concretização de qualquer metodologia é necessário uma elevada qualidade dos dados a trabalhar por forma a obter resultados reais, assim, recomenda-se que a origem dos dados seja automatizada a partir do software de gestão da manutenção, de modo a libertar recursos humanos e aumentando o grau de confiança nos dados.

Com o sistema de inventariação de ativos corporativo, atualmente em curso, passará a ser possível indicar com clareza qual ou quais os componentes em que foi detetada falha e alocar essa falha ao histórico existente no componente ultrapassando assim a situação verificada de falta de rigor na hora de preenchimento das ordens de manutenção corretivas.

Através do sistema de telegestão é possível, ao instante, identificar se um equipamento se encontra em estado operativo ou em paragem e em caso de atividade quais as condições operacionais. Na figura 50 representativa do sistema de supervisão SCADA, podemos evidenciar as bombas a verde indicando funcionamento correto, a vermelho, indicando que se encontram avariadas e ainda, o nível do poço de bombagem, representado sobre a coluna azul, bem como o valor medido (neste caso 5.0 metros).

No entanto, neste momento, não existe qualquer comunicação entre o SCADA e o sistema de gestão da manutenção aplicado, na obstante, uma solução para esta dificuldade é abordada em [31].



Figura 50 - SCADA Genérico

5.9. Proposta de Mitigação de Falhas e Output de Resultados

Verificando a figura 42 observamos que a criticidade de avaria é dominada essencialmente pela severidade apresentando maior distribuição nos níveis 3 e superiores. Como tal e sendo este parâmetro uma ponderação de três escalas diferentes, observou-se que o “tempo de reparação” e a “influência” seriam os parâmetros com maior incidência nos níveis 3 e superiores.

Relativamente ao tempo de reparação verifica-se haver uma relação direta entre o valor de reparação e o tempo necessário à passagem de toda a fase administrativa associada à aquisição de componentes de substituição e/ou subcontratação de serviços (dada a regulamentação aplicável ao setor empresarial pelo estado) o que tem como consequência direta um maior período de inatividade.

Esta situação seria ultrapassada mediante o reajuste das políticas internas da empresa de forma a conseguir uma maior prontidão de resposta.

Conhecida a curva de fiabilidade da infraestrutura ou da etapa é possível alocar medidas como a execução de manutenção preventiva a cada x meses de modo a não permitir que a fiabilidade seja inferior a um valor imposto. Como tal começou-se por fazer uma verificação de qual o tempo médio ideal para a execução de manutenção preventiva – MP (figuras 51, 52 e 53)

Dado que cada equipamento tinha um determinado MTBF, estipulou-se que se realizaria manutenção preventiva a cada 0.85 períodos entre falhas para esse mesmo equipamento, resultando assim num período entre manutenções preventivas diferente de equipamento para equipamento.

Considerou-se o fator de 0.85 uma vez que se pretendia afinar o modelo de modo a determinar o valor de MP ideal tal que fosse respeitada a seguinte desigualdade (imposta pelo grupo):

$$R(t) \geq 50\% \quad (5.9)$$

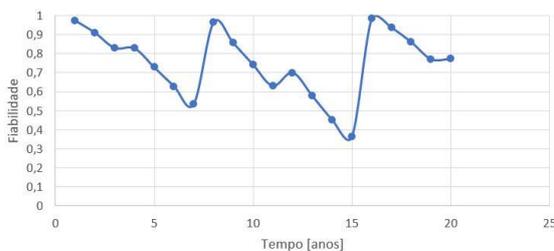


Figura 51 - Evolução da Fiabilidade com MP=0.75MTBF

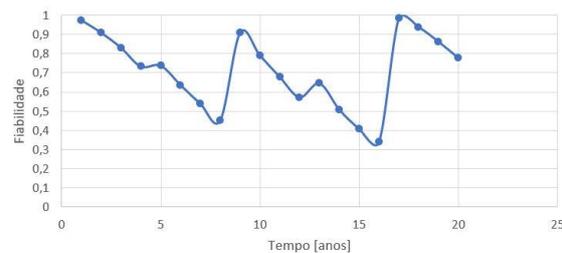


Figura 52 - Evolução da Fiabilidade com MP=0.8MTBF

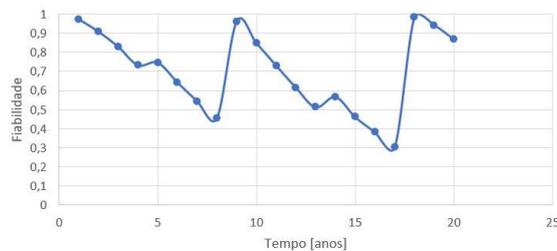


Figura 53 - Evolução da Fiabilidade com MP=0.85MTBF

De facto, conseguimos perceber que com o aumento do tempo para o qual se realizará manutenção preventiva a fiabilidade num determinado ano possui variações de +10% (salvo casos em que a ocorre uma reabilitação e a fiabilidade é aumentada substancialmente – e.g. ano 8). Face a este argumento a escolha recaiu pelo fator de 0.85 uma vez que esta é a solução (dentro das analisadas nas figuras) que diminui os custos de manutenção corretiva, uma vez que o número de intervenções será menor (considerando o mesmo período de tempo o número de intervenção será dado pelo rácio entre o intervalo de tempo a considerar e o fator, ou seja, $\frac{t}{0.85*MTBF}$, verificando-se $\frac{t}{0.85*MTBF} < \frac{t}{0.8*MTBF} < \frac{t}{0.75*MTBF}$). No entanto, por não cumprir os requisitos impostos ($R(t) > 50\%$) decorre a necessidade de afinação do modelo.

Há também de fazer a ressalva que após intervenção, considerou-se que o equipamento era colocado em serviço sob condição de “como novo”. Esta aproximação resulta da dificuldade em determinar qual o valor de fiabilidade real após manutenção preventiva, sendo este apenas possível determinar com dados experimentais e iterativamente por consecutivas tentativas de validação do modelo teórico.

Outra situação que importa esclarecer, por aparentemente parecer contraditório face à análise do gráfico, é o facto de se ter uma fiabilidade no ano 17 inferior à que se verifica no ano 8. O que acontece é que dado que os equipamentos apresentam manutenções desfasadas entre si, no tempo, a sua fiabilidade será, para um instante, diferente, motivado pelos tempos de funcionamento serem também eles diferentes (considera-se que no instante em que decorre uma intervenção, para efeitos de cálculos, o tempo de funcionamento é inicializado a zero e a fiabilidade é toda ela restituída – figura 54.

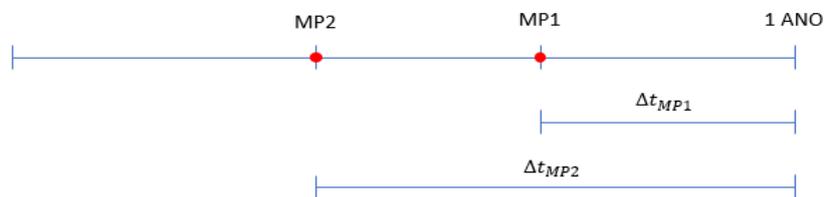


Figura 54 - Tempo de funcionamento para equipamentos sujeitos a diferentes intervalos de tempos de intervenção

Devido a esta diferença de fiabilidades, contabilizada num determinado ano, a curva apresentada não apresenta o comportamento esperado típico. Este fator, aliado ao facto de não cumprir os requisitos impostos (equação 5.9 - $R(t) > 50\%$) motivou uma outra abordagem que seria a estipulação de um tempo entre intervenções preventivas (tabela 13), para cada etapa, que fosse o valor mínimo dos valores obtidos de cada equipamento (constituintes da determinada etapa) de modo a permitir que todas as intervenções fossem realizadas pelo menos uma vez (figura 55).

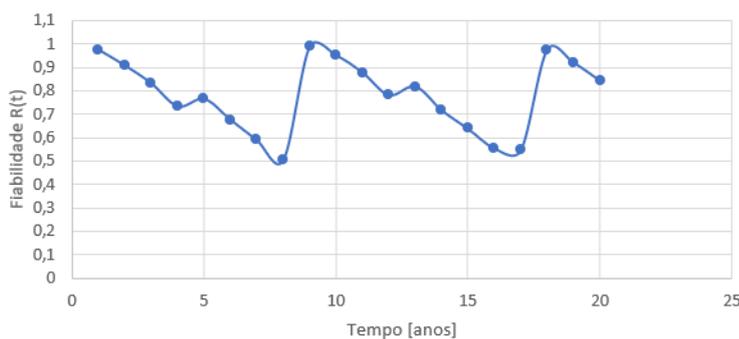


Figura 55 – $MP \text{ etapa} = \text{Min}\{0.85MTBF\}$ equipamentos

Tabela 13 - Intervalos de MP de etapas

Etapa	MP [meses]
A	30
B	25
C	105
D	50
E	50

Verificando-se que a condição imposta é respeitada e a curva apresenta o comportamento esperado típico decidiu-se melhorar a solução apresentada de modo a diminuir ainda mais os custos associados à deslocação do pessoal operacional sem penalizar a fiabilidade. Tendo-se encontrado o valor de $MP = 6$ anos, verificou-se válida a condição de fiabilidade (figura 56)

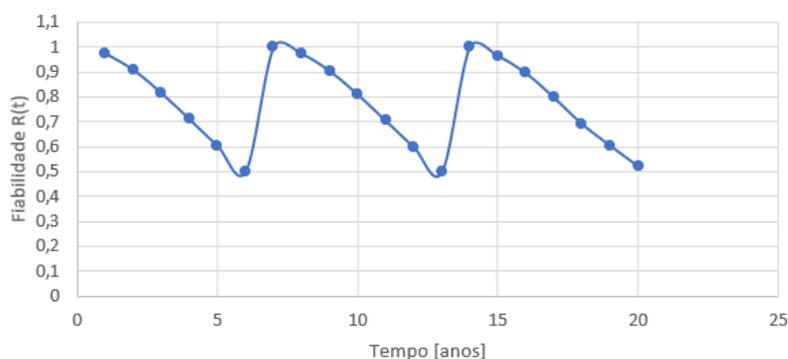


Figura 56 - Fiabilidade com $MP = 6$ anos

Enquanto que a solução apresentada na figura 55 conta com 18 intervenções, espaçadas no intervalo de 20 anos, a solução dada pela figura 56 permite uma redução de 90% no número de intervenções que apesar de se tornarem mais demoradas (não afetando suplementarmente a disponibilidade operacional, uma vez que é feita uma manutenção preventiva a todos os equipamentos da estação elevatória e não equipamento a equipamento em momentos diferentes), acaba por reduzir os custos de operação com a diminuição do número de deslocações a ser preponderante.

Há ainda que referir a possibilidade de manutenção preventiva condicional, abordada em [31], como uma medida complementar de mitigação de falhas sendo a mesma despoletada por variações nos sensores de vibração ou pressão das bombas, entre outros, (outros equipamentos que seguirão a mesma metodologia).

No estudo em questão foi considerada uma restituição total da fiabilidade (fator 1), no entanto, através de dados reais, espera-se que no futuro este valor possa ser atualizado e ajustado à situação real refletindo a quantidade e tipo de componentes intervencionados (intervenções em dois componentes do equipamento gerariam um aumento de fiabilidade menor que uma intervenção em cinco componentes do mesmo equipamento).

O estudo das ações de mitigação de falha baseou-se na figura 57 onde ações de prevenção foram enunciadas materializando-se na execução de manutenção preventiva. De facto, a atuação ao nível da severidade, como forma de aumentar o nível de disponibilidade dos equipamentos poderia ser feita, no entanto, face à realidade do tipo de investimentos presente no grupo, estima-se que a aplicação de medidas de proteção, visando a diminuição da severidade, como a aquisição de *stock* em armazém possa ser impraticável para um grande universo de equipamentos dado o seu elevado preço de aquisição.

No entanto, por falta de dados, tal estudo não foi possível de ser efetuado, uma vez que não foi possível a comparação do custo de armazém com o ganho em termos de redução de encargos monetários de manutenção.

Effect Category	Prevention (decreases Occurrence)	Protection (decreases Severity)
Design	Implement redundancy to reduce the risk of losing the function	Implement risk-containment provisions to avoid cascading failures as a recovery system of a BM assembled by RH and which could fall on the Divertor
Test	Apply specific tests in simulated operating conditions to check reliability of a component	Apply specific tests to ensure maintainability of components that require a long time to repair
Operation	Interlock operation of sensitive components with a safety check to avoid damage	Prepare specific training and procedures to allow falling back to a safe degraded mode in an emergency
Maintenance	Increase the frequency of inspections and preventive maintenance operations	Keep spares on-site so that time to repair is shortened

Figura 57 - Ações de Mitigação de falha típicas em cada uma das fases do projeto, [33]

5.10. Etapas, cuidados e implementação da metodologia

Visando a presente dissertação ser um documento pioneiro na implementação de uma metodologia de indicadores de fiabilidade para uma infraestrutura do grupo AdP no presente e alargado a todas as infraestruturas do grupo no futuro é necessário definir um plano de implementação sendo para tal necessário o cumprimento de determinadas etapas (figura 58):

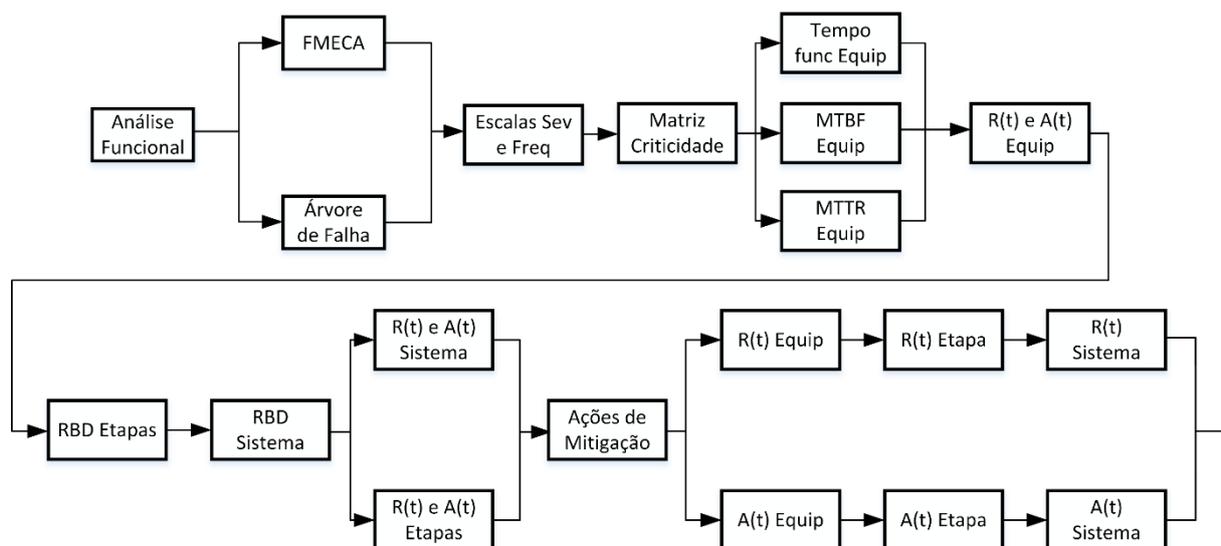


Figura 58 - Fluxograma etapas metodologia

Para garantir a análise funcional é necessário a identificação dos equipamentos existentes na infraestrutura, sendo, caso necessário, possível a adição ou remoção de equipamentos uma vez que

as subfunções associadas à função principal diferem mediante se trate de uma estação elevatória de abastecimento ou de saneamento.

Mediante as subfunções assinaladas na análise funcional também os modos de falha associados às mesmas diferem mediante a tipologia de infraestrutura (e.g. estações elevatórias com linha de funcionamento com cota decrescente ao longo da estação). Neste ponto torna-se imperativo o conhecimento do funcionamento da EE sendo necessário o acesso ao caderno de encargos e à memória descritiva do projeto e automação (estes documentos explicam o funcionamento dos equipamentos da EE) de modo a determinar as consequências de determinadas avarias de equipamentos (e.g. sonda de nível máximo pode fazer *by-pass* para caixa de reserva que, por sua vez, ligará ao poço de bombagem em vez de originar descarga diretamente).

Com a *Criticality Analysis*, obtêm-se classificações para a severidade e frequência das avarias dos equipamentos (através da comparação dos mesmos com as escalas impostas) sendo possível obter a matriz de criticidade com os elementos necessários à construção dos diagramas de blocos para as etapas da infraestrutura (subsistema) e conseqüentemente para a infraestrutura (sistema).

No entanto, a obtenção dos indicadores de fiabilidade só será possível com um conjunto de três parâmetros essenciais: o tempo de funcionamento, t , o tempo médio entre falhas, $MTBF$, e o tempo médio de reparação, $MTTR$, sendo que tais virão discriminados nos relatórios abordados em [31].

Tendo o comportamento da fiabilidade e disponibilidade atualizados ao instante, com os dados do relatório, é possível saber em tempo real a situação da fiabilidade ou disponibilidade da etapa ou infraestrutura. Sabendo que a fiabilidade da infraestrutura é, num ponto, composta pelo produto das fiabilidades das etapas (sendo estas, também, por sua vez, compostas por associações série e paralelo de equipamentos) é possível identificar qual a etapa crítica (aquela que minimiza a fiabilidade do sistema), podendo o mesmo raciocínio ser aplicado aos equipamentos constituintes da etapa afim de calendarização de manutenção preventiva e restituição da fiabilidade.

Relativamente à calendarização da implementação da metodologia, prevê-se que num espaço de 2 anos, já se possua histórico associado a cada um dos equipamentos das estações elevatórias pois o processo de inventariação de ativos terminará até ao final de 2018, sendo que, dentro de 5 anos, se estima a concretização da metodologia e resultados fiáveis nas cerca de 2700 EE do grupo (destacando todas as dificuldades inerentes como a criação de casos especiais como adição de equipamentos ou funções e conseqüente arranjo em diagrama de blocos).

Após aplicação nesta tipologia de infraestruturas, sugere-se passar para as ETAR, e por fim às ETA, considerando aceitável que num universo temporal de 15 anos, todas as infraestruturas do Grupo possam estar monitorizadas.

5.11. Pressupostos para implementação da metodologia

De modo a garantir a funcionalidade da metodologia apresentada certas fases e pressupostos essenciais terão de ser cumpridos, nomeadamente:

- Implementação do sistema de inventariação de ativos que permita alocar uma ordem de trabalho não à localização da infraestrutura (nível 6), mas sim ao ativo ou componente, inequivocamente (nível 9).
- O software de gestão da manutenção tem de ser capaz de alocar o histórico de manutenção de um equipamento à sua nova localização caso haja uma substituição do mesmo.
- Implementação de um modelo de aquisição e organização de dados, onde informações como tempo entre avarias, horas de funcionamento e tempos de reparação venham discriminados para cada equipamento [31].
- Distinção entre ações e tempos de paragem de manutenção corretiva e preventiva sem perda de funcionalidade.
- Validação do modelo de RBD definido.

Um dos grandes pontos de viragem no paradigma da manutenção no Grupo é a criação de um sistema de inventariação de ativos bem como o fornecimento de dados do software de telegestão (SCADA) para o software de gestão da manutenção (*Aquaman*), em tempo real, que permita a concretização dos tempos médios entre falhas. Todas estas informações serão transportadas para o software de gestão da manutenção que gerará relatórios de ordens de trabalho [31]. Assim pode-se determinar as curvas de fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos e concretizar para as etapas e finalmente para a infraestrutura (através dos diagramas de blocos).

Sempre que existe uma substituição de um equipamento, o histórico de OT deve acompanhá-lo se for um equipamento usado, devendo ser guardado um registo de todos os equipamentos que passaram por aquela posição, algo que virá mencionado no relatório de ordem de trabalho.

Há que distinguir os tempos de intervenção no equipamento que causam ou não perda de funcionalidade, aquando de uma manutenção preventiva de um equipamento cujo funcionamento não tinha sido solicitado não existe perda de funcionalidade e conseqüentemente a disponibilidade não é alterada.

Finalmente é necessária a validação do modelo de blocos utilizado. Como tal, considera-se prudente a criação de um controlo ativo à função elevar, ou seja, durante todo o tempo de monitorização do estado dos equipamentos haver também o registo da condição de “Eleva/Não Eleva” de modo a compatibilizar qual ou quais avarias dos equipamentos possam gerar de facto perda de funcionalidade.

6. Conclusões e Trabalhos futuros

A realização deste documento culminou num leque de conclusões relativas ao estado do processo de manutenção atual no grupo, permitindo dar respostas portadoras de melhorias operacionais. Considera também a possibilidade de novos trabalhos face a dificuldades e simplificações adotadas ao longo do estudo.

6.1. Conclusões e limitações do método

Este trabalho teve como objetivo principal a definição e implementação de uma metodologia e soluções que permitissem medir o nível de operacionalidade de uma dada infraestrutura através do cálculo de indicadores de fiabilidade como a Disponibilidade ou a Fiabilidade, sendo esta última um *trigger* para a realização de manutenção preventiva.

O desenvolvimento do projeto piloto começou com uma análise às intervenções de manutenção corretiva aplicadas, onde foi possível caracterizar os eventos de manutenção pelas tipologias de equipamentos no espaço e no tempo.

Dado o preço, volume e acessibilidade da equipa de operação aos equipamentos verificou-se que a manutenção no Grupo era essencialmente corretiva sendo a grande maioria das reparações (cerca de 70%) do tipo “melhoria” assumindo as restantes o carácter de “substituição”, o que é justificado pelo elevado preço de aquisição de grande maioria dos equipamentos inviabilizando uma existência de *Stock* devido a um preço de inventário excessivo.

Para a classificação dos equipamentos quanto à sua criticidade foram criados três níveis resultantes do produto de duas classificações distintas, a severidade e a frequência. Para a severidade foi desenvolvida uma metodologia de classificação que assenta sob critérios de custo, tempo de inoperabilidade (considerado, por aproximação, igual ao MTTR) e criticidade de localização do equipamento que traduz o impacto da falha na concretização da função principal da infraestrutura enquanto que para a frequência considerou-se o tempo médio entre falhas dos equipamentos.

Esta classificação permitiu identificar os equipamentos críticos da Estação Elevatória, ou seja, quais os equipamentos que deverão ser geridos com especial atenção dada a sua propensão à falha e às consequências gravosas que advenham da mesma.

Visando identificar as necessidades de reparação procedeu-se à análise de fiabilidade da infraestrutura (considerando o sistema composto por todos os componentes críticos) através da ferramenta de diagrama de blocos, tendo, para tal, sido consideradas as possibilidades de falha dadas pela análise de Árvore de Falha. Para esta análise recorreu-se à distribuição exponencial negativa, dada a sua simplicidade de cálculo. Com esta distribuição foi possível obter a evolução da probabilidade de falha tendo-se obtido um tempo médio entre falhas (MTBF) ideal, por sucessivas aproximações, tal que um critério de fiabilidade mínimo fosse respeitado e os custos decorrentes de ação de manutenção corretiva fossem o mais diminutos possível, o que permitiu sugerir uma periodicidade ideal para a realização de manutenção preventiva.

Considerando a fórmula geral de disponibilidade (equação 2.26) foi possível verificar que esta é praticamente constante ao longo do tempo desde a instalação da infraestrutura, motivado pela diferença de grandezas verificada entre o MTBF e o MTTR.

Em suma ao longo desta dissertação foram possíveis retirar as seguintes conclusões:

- O registo das ordens de trabalho no software de gestão da manutenção e ativos utilizado no grupo está, neste momento, bastante direcionado para a regulação de custos internos. Situação que se espera ver alterada através do processo de inventariação de ativos que obrigará a utilização do código de localização ao nível 9, essenciais ao desenvolvimento da metodologia.
- A obtenção dos valores de MTBF, MTTR e tempo de funcionamento não são obtidos de forma automática, por falta de comunicação entre o SCADA e o software de gestão da manutenção, situação que também será alterada com a implementação de um novo contrato deste software.
- Atualmente a monitorização dos níveis de serviço associados a uma determinada infraestrutura é inexistente, permitindo assim, através desta metodologia, a construção desta ponte de forma a poder ser abrangida a todas as infraestruturas do grupo no futuro dada a sua razão de semelhança em termos de funcionamento.

Relativamente à análise feita, foi utilizada uma distribuição exponencial negativa para o cálculo da fiabilidade considerando que o sistema se apresentava em situação de vida útil, aproximação esta que transmitiu resultados confiáveis do ponto de vista operacional, validados pelo departamento de manutenção da empresa gestora da EE do Jamor, Águas do Tejo Atlântico.

Por escassez de tempo não foi possível uma validação analítica dos resultados através do cálculo por outra distribuição (e.g. Distribuição de *Weibull*). Como tal, do ponto de vista teórico, seria correto o cálculo através de uma distribuição de *Weibull*, de tal forma que o cálculo da fiabilidade seria ajustado à fase de vida a que o equipamento se encontrava.

Apesar disso, dado o objetivo ser a aplicação de uma metodologia simples com resultados confiáveis do ponto de vista operacional, é possível alcançar as metas estipuladas com as ferramentas utilizadas.

Espera-se assim, que este trabalho possa vir a contribuir para uma melhoria da gestão da manutenção em todas as empresas do Grupo AdP.

6.2. Trabalhos Futuros

De modo a colmatar e a completar certos pontos desta metodologia considera-se pertinente a realização das seguintes atividades como trabalhos futuros:

- Realizar uma análise de condição de falha à EE de modo a relacionar o caudal de entrada com o tipo de configuração dos diagramas de blocos (e.g. passar de um paralelo ativo para um paralelo restrito) através de matrizes de criticidade dinâmicas que modificam os seus pontos com base na atualização de valores de severidade e frequência, dados na análise FMECA aquando da ocorrência de uma falha (ter em conta como se poderão considerar as redundâncias de equipamentos – ter um caudal excessivo e avariar uma bomba implicará uma maior classificação de influência nas restantes bombas do que ter um caudal nominal e a mesma situação ocorrer).
- Realização da análise tendo em conta a possibilidade de aplicação de uma nova distribuição de fiabilidade (e.g. distribuição de Weibull)
- Estudo do coeficiente de restituição de fiabilidade aquando de realização de manutenção preventiva e validação com dados reais.
- Estudo da relação de custos de manutenção (humanos e material) com o custo de perda de funcionalidade do equipamento.
- Aplicação da metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho às restantes tipologias de infraestruturas do grupo: ETAR e ETA.

Referências Bibliográficas

- [1] (2014). *Norma ISO 55000 - Gestão de ativos – Visão geral, princípios e terminologia*.
- [2] Bhawgan. (2009). *Compendium of Best Practices in Water Infrastructure Asset Management*. Global Water Research Coalition.
- [3] Águas de Portugal. (2014). *Gestão de Ativos AdP – Guia Metodológico V0.0*. Lisboa
- [4] H. P. Carinhas, *Sebenta de Tribologia e Manutenção – Fiabilidade*, Lisboa: Secção de Folhas - I.S.T. - Instituto Superior Técnico, Maio, 2009
- [5] Norma NP EN 13306 – Terminologia de Manutenção, Edição Set 2007
- [6] Assis, R. (Março, 2010). *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos*. Lisboa: LIDEL - Edições Técnicas.
- [7] Sobral, J. (Setembro 2001). *Texto de Apoio à disciplina de Gestão da Manutenção*. I.S.E.L. – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- [8] Mira, P., “*Necessidade e Disponibilidade de materiais em Manutenção - Um caso de estudo na Brisa*”, Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia Mecânica, I.S.T. – Instituto Superior Técnico, Dezembro 2014
- [9] DoD. (20 de Agosto de 2018). DoD Guide for achieving *Reliability, Availability and Maintainability*, August 3, 2005.
- Obtido de:
[http://www.acqnotes.com/Attachments/DoD%20Reliability%20Availability%20and%20Maintainability%20\(RAM\)%20Guide.pdf](http://www.acqnotes.com/Attachments/DoD%20Reliability%20Availability%20and%20Maintainability%20(RAM)%20Guide.pdf)
- [10] Ben-Daya, M., O.Duffuaa, S., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. New York: Springer.
- [11] weibull (19 de 09 de 2018). *Relationship Between Availability and Reliability*.
- Obtido de Weibull.com: <https://www.weibull.com/hotwire/issue26/relbasics26.htm>
- [12] Smith, D. J. (2011). *Reliability maintainability and risk 8th*. Butterworth-Heinemann: Elsevier.
- [13] Águas de Portugal. (25 de 5 de 2018).
- Obtido de <http://www.adp.pt/pt/atividade/onde-estamos/?id=27>
- [14] AdP, SGPS. (2018). *Relatório e contas 2017*.
- [15] AdP, SGPS. (2016). *Relatório e contas 2015*.
- [16] AdP, SGPS. (2014). *Relatório e contas 2013*.

- [17] Águas de Portugal (2017). *Águas de Portugal*.
Lisboa: By the Book, Edições Especiais, Ida. para AdP - Águas de Portugal, SGPS, S.A.
- [18] Diário da República. (15 de 01 de 2007). Lei n.º 2/2007, Série I, nº10/2007, pp. 320 - 335.
- [19] ERSAR. (2017). *RASARP*. Lisboa: Edições Anuais do RASARP.
- [20] APA. (16 de 9 de 2018). *PEAASAR II - Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e Saneamento de Águas Residuais 2007-2013*:
Obtido de <https://www.apambiente.pt/zdata/Planeamento/PEAASAR.pdf>
- [21] APA. (16 de 09 de 2018). *PENSAAR 2020 - Nova Estratégia para o setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais 2020*.
Obtido de <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=7&sub2ref=9&sub3ref=1098>
- [22] APA. (Abril 2015). *PENSAAR 2020 - Uma nova Estratégia para o setor de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais - Vol I*. Lisboa
- [23] ERSAR. (27 de 05 de 2018).
Obtido de <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao>
- [24] ERSAR. (27 de 05 de 2018).
Obtido de <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/abastecimento-de-agua>
- [25] ERSAR. (27 de 05 de 2018).
Obtido de <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/saneamento-de-aguas-residuais>
- [26] Águas do Norte. (2 de 5 de 2018). *Tratamento de águas*.
Obtido de <http://www.adnorte.pt/pt/educacao-ambiental/ciclo-urbano-da-agua/tratamento-de-agua/?id=115>
- [27] Águas do Norte. (2 de 6 de 2018). *Tratamento de águas Residuais*.
Obtido de <http://www.adnorte.pt/pt/educacao-ambiental/ciclo-urbano-da-agua/tratamento-de-aguas-residuais/?id=116>
- [28] Diário da República. (19 de 06 de 1997). Decreto-Lei nº 152/97. I Série-A, nº139, pp. 2964-2966
- [29] Águas de Portugal. (2013). *Ficha de Cadastro de Ativos*. Lisboa.
- [30] Portal, E. E. (20 de 09 de 2018). *What makes a good SCADA system?*
Obtido de <https://electrical-engineering-portal.com/specifying-implementing-good-scada-system>
- [31] Pinto, A.C., "Contribuições para a melhoria do sistema de informação de suporte à manutenção: Um caso de estudo no Grupo Águas de Portugal", Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia Mecânica, I.S.T. – Instituto Superior Técnico, Outubro 2018.

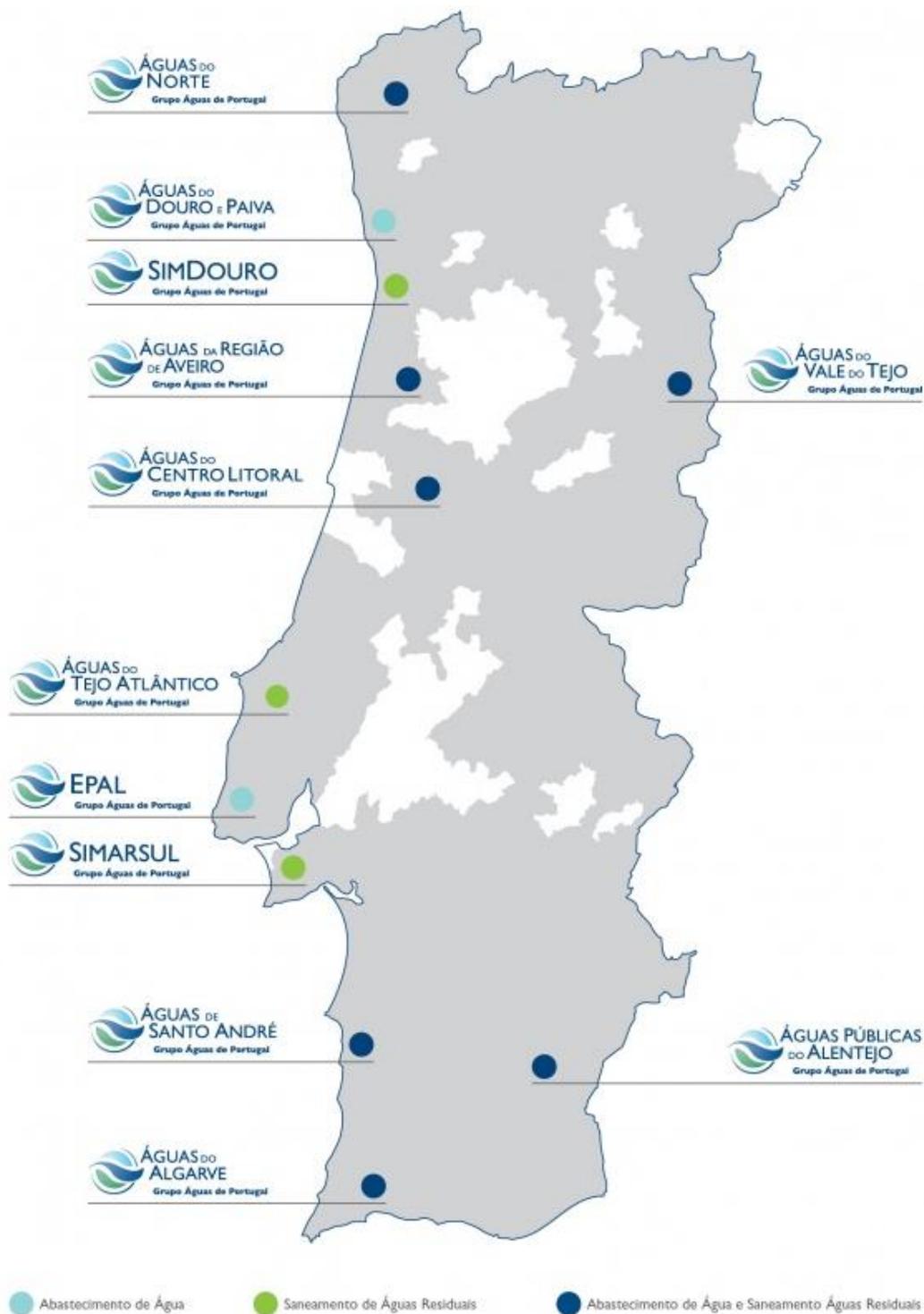
[32] weibull (13 de 10 de 2018). Derivations of Failure Rate Equations for Series and Parallel Systems.

Obtido de Weibull.com: <https://www.weibull.com/hotwire/issue181/article181.htm>

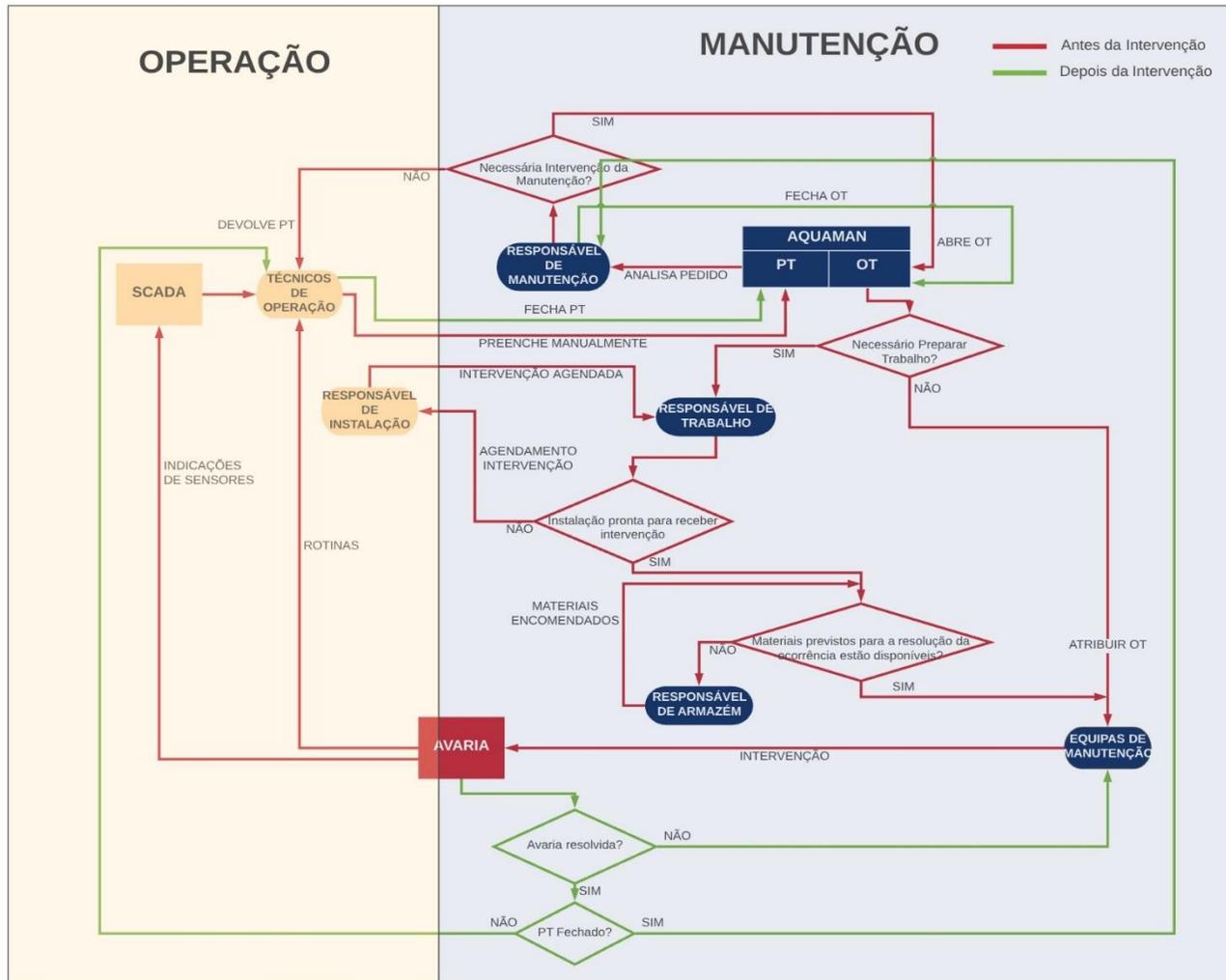
[33] Slides de apoio à U.C. de Tribologia e Manutenção – “*RAM Analysis*”, Infante, Virgínia; Henriques, Elsa

Anexos

Anexo A – Distribuição Geográfica empresas Grupo Águas de Portugal



Anexo B – Esquema do processo de manutenção



Fonte: [31]

Anexo C – Campos disponibilizados em Excel

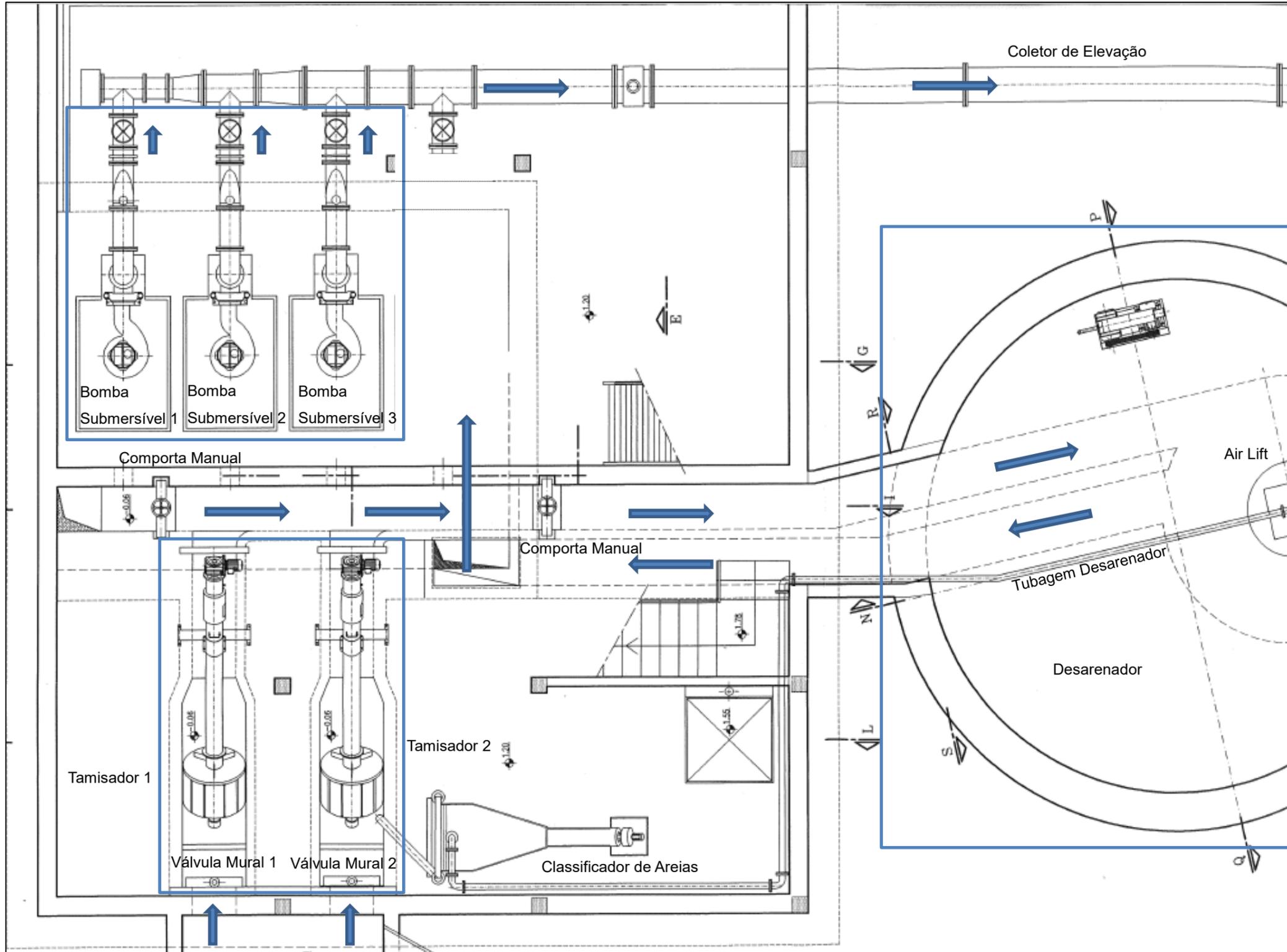
A	B	C	D
DESC_AREA_NEGOCIO	DESC_FAMILIA	DESC_ATIVIDADE	OT
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	ETAR até 2 000 habitantes	Gestão operacional	0400-1115254
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	ETAR acima de 100 000 habitantes	Pré-Tratamento	0400-1106195
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	Estações Elevatórias	Elevar	0400-1102719
G. Abast. Água - Prod. e Transp. (Alta)	ETA até 20 000 habitantes	Tratamento e Destino Final de Lamas	0400-1102739
G. Abast. Água - Prod. e Transp. (Alta)	ETA até 20 000 habitantes	Tratamento em ETA	0400-1102735
G. Abast. Água - Prod. e Transp. (Alta)	Estações Elevatórias	Tratamento Correctivo	0400-1102747
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	Estações Elevatórias	Gestão operacional	0400-1103085
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	ETAR até 2 000 habitantes	Pequenas Instalações de Tratam.	0400-1102742
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	ETAR acima de 15 000 até 100 000 hab.	Tratamento Secundário	0400-1103392
G. Sanea. -Trat. e Destino Final(Alta)	Estações Elevatórias	Elevar	0400-1103429

F	G	H	I	J
Desc. OT	COD_LOCALIZACAO	DESC_LOCALIZACAO		FILTRO_COD_LOC_OT
ETAR St. caudalímetro	3-CA-302-305-001-312	Gestão operacional		MEDIDOR DE CAUDAL
Parafuso Elevação D 2º Estágio	3-FR-301-302-101-301	Pré-Tratamento		Elevação Efluente - Parafuso Arquimedes
B1 EE1 de em avaria	3-MF-311-306-102-309-130-BOM002	172EE01BS1 Bomba submersível 1		BOMBA SUBMERSIVEL
ETA Rio - Bb Tanque Águas Sujas	1-ZN-RFU-105-472-106-201	Recolha de águas sujas		BOMBA 6
ETA Rio - Lavatório	1-ZN-RFU-105-472-104-700	Sistemas de apoio geral		ESTRUTURAS
EE - Recloragem	1-ZN-RFU-106-551-105-121	Desinfecção final/Recloragem		DESINFECAO/PRE OXIDACAO
Avaria boias mínimo e arranque	3-RH-MCR-306-E03-312	Gestão operacional		ANALISADOR
ETAR - Tamisador	3-FZ-DOR-305-197-300-102	Tratamento preliminar		EQUIPAMENTO DE GRADAGEM
caixas WC obstruídas	3-OB-CHR-303-T01-303	Tratamento Secundário		ELIMINAR
Bomba 2 com avaria	3-RS-SCS-306-E25-309	Elevar		BOMBA 6
Falha de energia	3-RS-SCS-306-E27-309	Elevar		INSTALACOES ELETRICAS
linha 2 não debita caudal normal	3-DT-ATB-306-E08-309	Elevar		BOMBA 6
Iluminação Piso 0 desidratação	3-02-100-302-301-305-900-EST110	Edifício da desidratação, sec. term. e cogeração		ESTRUTURAS

Campos disponibilizados em Excel - continuação

AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
DATA_INICIO_REAL	DATA_FIM	HORA_INICIO_REAL_REF	HORA_FIM_REAL_REF	DATA_REGISTO	HORA_REGISTO_REF	HORA_REGISTC	HORA_INICIO_REAL	HORA_FIM_REAL
18/11/2016	21/11/2016	17:30:48:131000	08:59:25:888000	25/10/2016	15:37:17:567000	15:37:17	17:30:48	08:59:25
23/09/2016	26/09/2016	13:00:00:000000	17:00:00:000000	02/08/2016	09:22:13:235000	09:22:13	13:00:00	17:00:00
30/06/2016	08/07/2016	17:00:00:000000	12:00:00:000000	01/07/2016	08:17:24:847000	08:17:24	17:00:00	12:00:00
28/06/2016	28/06/2016	09:00:00:000000	10:00:00:000000	01/07/2016	15:26:46:000000	15:26:46	09:00:00	10:00:00
23/06/2016	23/06/2016	15:00:00:000000	15:30:00:000000	01/07/2016	15:25:08:420000	15:25:08	15:00:00	15:30:00
29/06/2016	29/06/2016	16:00:00:000000	17:00:00:000000	01/07/2016	15:37:35:653000	15:37:35	16:00:00	17:00:00
03/07/2016	03/07/2016	10:00:00:000000	19:00:00:000000	04/07/2016	08:56:45:438000	08:56:45	10:00:00	19:00:00
04/07/2016	04/07/2016	08:30:00:000000	10:00:00:000000	01/07/2016	15:34:47:947000	15:34:47	08:30:00	10:00:00
11/05/2016	11/05/2016	09:00:00:000000	11:00:00:000000	05/07/2016	17:34:24:441000	17:34:24	09:00:00	11:00:00
01/07/2016	12/07/2016	15:00:00:000000	13:00:00:000000	06/07/2016	08:49:48:068000	08:49:48	15:00:00	13:00:00
01/07/2016	02/07/2016	23:00:00:000000	01:00:00:000000	06/07/2016	08:52:56:635000	08:52:56	23:00:00	01:00:00
02/07/2016	02/07/2016	15:30:00:000000	19:00:00:000000	05/07/2016	16:43:34:889000	16:43:34	15:30:00	19:00:00
05/07/2016	05/07/2016	14:00:00:000000	15:00:00:000000	04/07/2016	16:36:20:746000	16:36:20	14:00:00	15:00:00
04/07/2016	04/07/2016	09:00:00:000000	11:00:00:000000	04/07/2016	16:25:17:519000	16:25:17	09:00:00	11:00:00
05/07/2016	05/07/2016	09:00:00:000000	10:00:00:000000	04/07/2016	16:15:38:074000	16:15:38	09:00:00	10:00:00
05/07/2016	05/07/2016	11:00:00:000000	13:00:00:000000	04/07/2016	22:10:08:302000	22:10:08	11:00:00	13:00:00
05/07/2016	05/07/2016	08:00:00:000000	09:30:00:000000	04/07/2016	21:49:17:040000	21:49:17	08:00:00	09:30:00
05/07/2016	05/07/2016	16:00:00:000000	17:00:00:000000	06/07/2016	15:18:11:518000	15:18:11	16:00:00	17:00:00
06/07/2016	06/07/2016	12:00:00:000000	13:00:00:000000	06/07/2016	16:02:17:284000	16:02:17	12:00:00	13:00:00
05/07/2016	05/07/2016	10:30:00:000000	14:30:00:000000	06/07/2016	09:42:43:312000	09:42:43	10:30:00	14:30:00
06/07/2016	13/07/2016	16:44:47:681000	18:30:44:209000	01/07/2016	15:37:16:746000	15:37:16	16:44:47	18:30:44
28/06/2016	28/06/2016	13:00:00:000000	16:45:00:000000	06/07/2016	11:00:12:687000	11:00:12	13:00:00	16:45:00
06/07/2016	06/07/2016	09:00:00:000000	10:00:00:000000	01/07/2016	15:12:53:302000	15:12:53	09:00:00	10:00:00
01/07/2016	01/07/2016	09:00:00:000000	13:00:00:000000	01/07/2016	18:32:37:089000	18:32:37	09:00:00	13:00:00
04/07/2016	04/07/2016	11:00:00:000000	17:00:00:000000	04/07/2016	11:55:06:285000	11:55:06	11:00:00	17:00:00
04/07/2016	04/07/2016	11:00:00:000000	12:00:00:000000	01/07/2016	16:20:20:258000	16:20:20	11:00:00	12:00:00

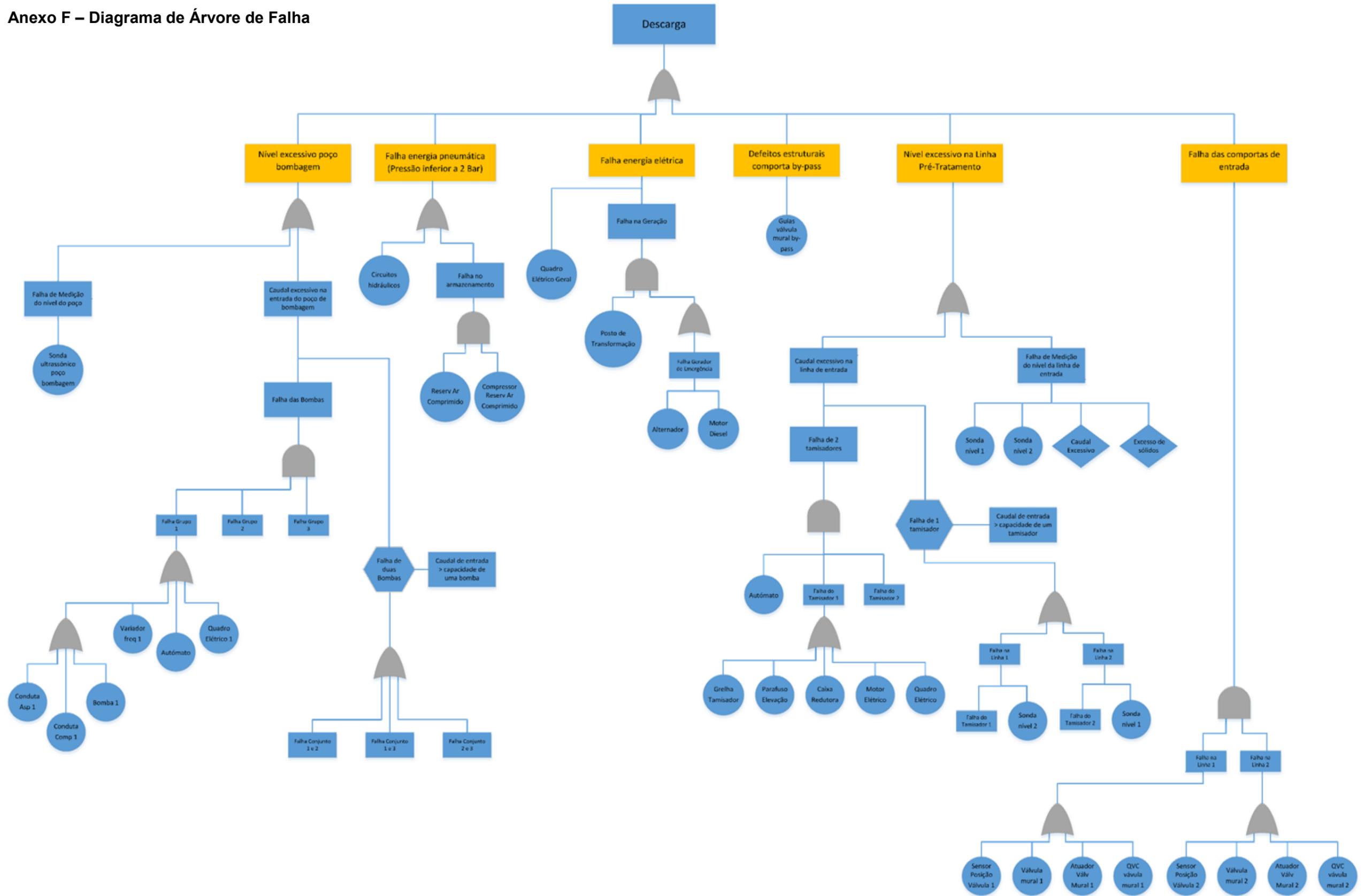
Anexo D – Esquema da Planta da Estação Elevatória do Jamor



Anexo E – Análise Funcional Estação Elevatória do Jamor

Componentes/Funções	Controlar Caudal de Entrada na Estação Elevatória	Remover sólidos	Controlar Caudal na Etapa de Pré-Tratamento	Isolar Caudal dos Equipamentos	Remover Areias	Monotorizar / Controlo dos Equipamentos	Garantir Energia Elétrica	Garantir Energia Elétrica em caso de Falha de PT	Garantir Energia Pneumática	Garantir Descargas de Emergência	Garantir Acesso de Operação às Instalações	Controlar Caudal no Poço de Bombagem	Elevar Águas Residuais do poço Bombagem
Posto de Transformação													
Gerador Emergência													
Autómato													
Quadro Elétrico Geral													
Válvula Mural By-Pass EE													
Quadro Válvula Comando Mural By-Pass EE													
Atuador Pneumático Válvula Mural By-Pass EE													
Válvula Mural Linha-Pré Tratamento													
Atuador Pneumático Válvula Mural Linha Pré-Tratamento													
Quadro Válvula Comando Mural Linha Pré-Tratamento													
Grelha tamisador													
Parafuso elevação Tamisador													
Caixa Redutora Parafuso-Motor													
Motor elétrico Tamisador													
Quadro Elétrico Tamisador													
Sondas de Nível Linha Pré-Tratamento													
Sonda de nível máximo Linha Pré-Tratamento													
Comporta Manual isolamento Desarenador													
Comporta Manual de by-pass ao Desarenador													
Ponte Raspadora Desarenador													
Motor elétrico Ponte Raspadora													
Motor Air Lift													
Compressor Air Lift													
Quadro Elétrico Compressor Air Lift													
Parafuso classificador de Areias													
Caixa Redutora parafuso classificador - Motor Elétrico													
Quadro Elétrico Classificador de Areias													
Motor Elétrico Classificador de Areias													
Compressor Rede Ar Comprimido													
Reservatório Rede Ar Comprimido													
Quadro Elétrico Compressor Rede Ar comprimido													
Filtro Carvão Ativado													
Ventilador Filtro Carvão ativado													
Ventilador de Insuflação													
Bomba Submersível													
Variador de Freqüência da Bomba Submersível													
Quadro Elétrico Bomba Submersível													
Válvula de Não Retorno													
Válvula de Retenção													
Sonda de Nível Máx Poço Bombagem													
Medidor de Nível Poço Bombagem Ultrassónico													

Anexo F – Diagrama de Árvore de Falha



Anexo G – Tabela de componentes escala de Severidade de falha

Regime típico	MTBF	SEVERIDADE	MTTR [h]	ESCALA MTTR	CUSTO [€]	ESCALA CUSTO	CRITICIDADE DE LOCALIZAÇÃO
Bomba Submersível 1	995,71	4,25	404,23	5	1943	2	5
Bomba Submersível 2	995,71	4,25	406,39	5	1943	2	5
Bomba Submersível 3	1742,50	4,25	283,50	5	1943	2	5
Conduta de Compressão 1	659,78	4	251,75	5	115	1	5
Conduta de Compressão 2	1056,29	3,5	48,54	3	115	1	5
Conduta de Compressão 3	1232,33	4	314,80	5	115	1	5
Zona de Aspiração 1	2464,67	3	0,25	1	115	1	5
Zona de Aspiração 2	2464,67	3,25	5,25	2	115	1	5
Zona de Aspiração 3	2464,67	3,75	56,00	4	115	1	5
Grelha do Tamisador 1	1478,80	3	28,50	3	105	1	4
Grelha do Tamisador 2	1056,29	3,5	191,50	5	105	1	4
Parafuso de Elevação do Tamisador 1	1056,29	2,75	9,83	2	840	1	4
Parafuso de Elevação do Tamisador 2	924,25	3,5	187,43	5	840	1	4
Motor Elétrico do Tamisador 1	3697,00	2,5	1	1	700	1	4
Motor Elétrico do Tamisador 2	3697,00	2,5	1	1	700	1	4
Compressor Air Lift	616,17	2,75	71,45	4	427,96	1	3
Motor Air Lift	3697,00	3,25	160,00	5	2890	2	3
Parafuso Classificador de Areias	1848,50	3,25	344,00	5	1798	2	3
Caixa Redutora do Classificador de Areias	7394	2,25	8	2	560	1	3
Quadro Elétrico do Classificador de Areias	7394	2,75	24,50	3	1715	2	3
Motor Elétrico do Classificador de Areias	3697,00	2	1,00	1	70	1	3
válvula mural Linha 1 Pré-tratamento	2464,67	3,5	28,75	3	323	1	5
válvula mural Linha 2 Pré-tratamento	7394,00	3,5	22,00	3	323	1	5
Atuador pneumático da válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	3697,00	4	568,00	5	514	1	5
Atuador pneumático da válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	2464,67	4	872,00	5	514	1	5
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	3697,00	4	176,00	5	514	1	5
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	2464,67	3,5	32,50	3	236	1	5
Válvulas Manuais	7394	2	2	1	236	1	3
Sonda de nível Linha 1 Pré-Tratamento	2464,67	4	113,00	5	7910	3	4
Sonda de nível Linha 2 Pré-Tratamento	7394,00	3,5	59	4	4130	2	4
Sonda de nível máximo Linha 1 Pré-Tratamento	7394	2,75	8	2	560	1	4
Sonda de nível máximo Linha 2 Pré-Tratamento	7394	2,75	8	2	560	1	4
Medidor de nível ultrassônico poço bombagem	7394,00	3,25	7	2	490	1	5
Sonda de nível máximo de poço bombagem	7394	2,75	8	2	1400	1	4
Variador de frequência 1	7394	4	125	5	405	1	5
Variador de frequência 2	3697,00	4	304	5	405	1	5
Variador de frequência 3	3697,00	4	456	5	405	1	5
Autómato	7394	4	184,00	5	1200	1	5
QE geral	1848,50	3,75	24,50	3	1715	2	5
PT	7394	1,5	0,5	1	20	1	2
Quadro Elétrico Bomba 1	7394,00	3,5	24,50	3	70	1	5
Quadro Elétrico Bomba 2	7394	3,75	24,50	3	1715	2	5
Quadro Elétrico Bomba 3	3697,00	3,5	24,50	3	70	1	5
Quadro Elétrico do Tamisador 1	3697,00	2,5	3,00	1	210	1	4
Quadro Elétrico do Tamisador 2	7394	2,5	3,00	1	70	1	4
Quadro Elétrico dos Compressores Ar comprimido	7394	3	3,00	1	210	1	5
Compressores da rede de ar comprimido	1478,80	4	121,00	5	530	1	5
Reservatório de ar comprimido	2464,67	4,5	184,50	5	12915	3	5
Circuitos hidráulicos	1478,80	4,25	73,75	4	5162,5	3	5
Motor diesel	1848,50	4	105,67	5	50	1	5
Alternador	1848,50	4	157,67	5	30	1	5
Atuador Pneumático da válvula mural de by-pass	3697,00	4,75	608,00	5	42560	4	5
Guias da válvula mural de By-pass	7394	3	3,00	1	210	1	5
Filtro de carvão ativado	3697,00	1,5	3,00	1	210	1	2
Ventilador de extração	1465,00	1,75	9,33	2	653,3333333	1	2
Ventilador de insuflação	1302,00	3	136,25	5	9537,5	3	2
Quadro Elétrico do Compressor Air Lift	7394	1,5	1	1	70	1	2
Quadro válvula de comando da válvula mural de by-pass	3697,00	3	2,00	1	140	1	5
válvula mural de by-pass	3255,00	3	3,00	1	323	1	5
Caixa Redutora do tamisador 1	7394	2,75	8	2	560	1	4
Caixa Redutora do tamisador 2	7394	2,75	8	2	420	1	4
Sensor de posição Válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	3697,00	2	0,00	1	0	1	3
Sensor de posição Válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	2464,67	2	2,25	1	0	1	3

Anexo H – Tabela de componentes com escalas de Severidade e Frequência de falha

Falhas/componentes	#ordem	Frequência - F_i	Severidade - S_i	$S_i * F_i$
Bomba Submersível 1	1	2	4,25	8,5
Bomba Submersível 2	2	2	4,25	8,5
Bomba Submersível 3	3	2	4,25	8,5
Conduta de Compressão 1	4	3	4	12
Conduta de Compressão 2	5	2	3,5	7
Conduta de Compressão 3	6	2	4	8
Zona de Aspiração 1	7	2	3	6
Zona de Aspiração 2	8	2	3,25	6,5
Zona de Aspiração 3	9	2	3,75	7,5
Grelha do Tamisador 1	10	2	3	6
Grelha do Tamisador 2	11	2	3,5	7
Parafuso de Elevação do Tamisador 1	12	2	2,75	5,5
Parafuso de Elevação do Tamisador 2	13	2	3,5	7
Caixa Redutora do tamisador 1	14	1	2,75	2,75
Caixa Redutora do tamisador 2	15	1	2,75	2,75
Motor Elétrico do Tamisador 1	16	2	2,5	5
Motor Elétrico do Tamisador 2	17	2	2,5	5
Quadro Elétrico do Tamisador 1	18	2	2,5	5
Quadro Elétrico do Tamisador 2	19	1	2,5	2,5
Compressor Air Lift	20	3	2,75	8,25
Motor Air Lift	21	2	3,25	6,5
Parafuso Classificador de Areias	24	2	3,25	6,5
Caixa Redutora do Classificador de Areias	25	1	2,25	2,25
Quadro Elétrico do Classificador de Areias	26	1	2,75	2,75
Motor Elétrico do Classificador de Areias	27	2	2	4
válvula mural Linha 1 Pré-tratamento	28	2	3,5	7
válvula mural Linha 2 Pré-tratamento	29	1	3,5	3,5
Atuador pneumático da válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	30	2	4	8
Atuador pneumático da válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	31	2	4	8
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	32	2	4	8
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	33	2	3,5	7
Válvulas Manuais	34	1	2	2
Sonda de nível Linha 1 Pré-Tratamento	35	2	3,5	7
Sonda de nível Linha 2 Pré-Tratamento	37	2	3,25	6,5
Sonda de nível máximo Linha 1 Pré-Tratamento	39	1	2,75	2,75
Sonda de nível máximo Linha 2 Pré-Tratamento	40	1	2,75	2,75
Medidor de nível ultrassônico poço bombagem	41	1	3,25	3,25
Sonda de nível máximo de poço bombagem	42	1	2,75	2,75
Variador de frequência 1	43	1	4	4
Variador de frequência 2	44	2	4	8
Variador de frequência 3	45	2	4	8
Autômato	46	1	4	4
QE geral	47	2	3,75	7,5
PT	48	2	2,5	5
Quadro Elétrico Bomba 1	49	1	3,5	3,5
Quadro Elétrico Bomba 2	50	2	3,75	7,5
Quadro Elétrico Bomba 3	51	2	3,5	7
Quadro Elétrico dos Compressores Ar comprimido	52	1	3	3
Compressores da rede de ar comprimido	53	2	4	8
Reservatório de ar comprimido	54	2	4	8
Circuitos hidráulicos	55	2	4,25	8,5
Motor diesel	56	2	4	8
Alternador	57	2	4	8
Atuador Pneumático da válvula mural de by-pass	58	2	4	8
Guias da válvula mural de By-pass	59	1	3	3
Filtro de carvão ativado	60	2	1,5	3
Ventilador de extração	61	2	1,75	3,5
Ventilador de insuflação	62	2	2,5	5
Quadro Elétrico do Compressor Air Lift	63	1	1,5	1,5
Quadro válvula de comando da válvula mural de by-pass	64	2	3	6
válvula mural de by-pass	65	2	3	6
Sensor de posição Válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	66	2	2	4
Sensor de posição Válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	67	2	2	4

Anexo I – Tabela de Indicadores de fiabilidade e tempo de funcionamento de equipamentos

Falhas/componentes	Taxa de avarias λ [h ⁻¹]	Tempo de Funcionamento [t]	MTBF [anos]	MTTR [h]	Top/ MTTR	Disponibilidade A(t)
Atuador pneumático da válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	1,12704E-05	177456	10	568	312,5	0,99364
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	1,12704E-05	1,1111	10	176	0,0	0,99802
válvula mural Linha 1 Pré-Tratamento	5,6352E-06	1,1111	20	28,75	0,0	0,99984
Atuador pneumático da válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	1,12704E-05	177456	10	872	203,5	0,99027
Quadro Válvula de comando válvula mural Linha 2 Pré-Tratamento	1,12704E-05	1,1111	10	32,5	0,0	0,99963
Grelha do Tamisador 1	2,25408E-05	2368	5	28,5	83,0	0,99936
Parafuso de Elevação do Tamisador 1	3,38112E-05	2368	3,5	9,75	242,8	0,99967
Motor Elétrico do Tamisador 1	5,6352E-06	2368	20	24	98,8	0,99986
Sonda de nível Linha 2 Pré-Tratamento	5,6352E-06	177456	20	113	1570,5	0,99936
Grelha do Tamisador 2	3,94464E-05	3738	3	191,5	19,5	0,99250
Parafuso de Elevação do Tamisador 2	4,50816E-05	3738	2,5	187,5	20,0	0,99162
Sonda de nível Linha 1 Pré-Tratamento	1,12704E-05	177456	10	113	1570,5	0,99873
Zona de Aspiração 1	1,12704E-05	19003	10	0,25	76012,0	1,00000
Bomba Submersível 1	4,1846E-05	19003	2,5	404,25	47,0	0,98337
Conduta de Compressão 1	6,31526E-05	19003	2	251,75	75,5	0,98435
Zona de Aspiração 2	1,12704E-05	14564	10	5,25	2774,0	0,99994
Conduta de Compressão 2	3,38112E-05	14564	3,5	48,5	300,3	0,99836
Bomba Submersível 2	3,5868E-05	14564	3	406,5	35,8	0,98563
Variador de Frequência 2	1,12704E-05	14564	10	304	48,0	0,99659
Quadro Elétrico Bomba 2	5,6352E-06	14564	20	3	4854,8	0,99998
Zona de Aspiração 3	1,12704E-05	16862	10	56	301,0	0,99937
Conduta de Compressão 3	2,8176E-05	16862	4	314,75	53,5	0,99121
Bomba Submersível 3	1,1956E-05	16862	9,5	283,5	59,5	0,99662
Variador de Frequência 3	1,12704E-05	16862	10	456	37,0	0,99489
Quadro Elétrico Bomba 3	1,12704E-05	16862	10	3	5620,8	0,99997
Circuitos Hidráulicos	2,25408E-05	177456	5	73,75	2406,3	0,99834
Reservatório de Ar comprimido	1,12704E-05	5545,5	10	184,5	30,0	0,99792
Compressores da rede de ar comprimido	2,25408E-05	5545,5	5	121	45,8	0,99728
Alternador	1,69056E-05	520	7	157,75	3,3	0,99734
Motor Diesel	1,69056E-05	520	7	105,75	5,0	0,99822
Posto de Transformação	5,6352E-06	177456	20	2	88728,0	0,99999
Quadro Elétrico Geral	2,25408E-05	177456	5	24,5	7243,0	0,99945