AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS: DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DE MEDIDAS DE MELHORIA

Bernardo Manuel Veiga Alçada Mendonça Batista

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:
Professora Dídia Isabel Cameira Covas
Doutora Dália Susana dos Santos da Cruz Loureiro

Júri

Presidente: Professor Rodrigo De Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Doutora Dália dos Santos da Cruz Loureiro

Vogais: Professora Helena Margarida Machado da Silva Ramos
Doutora Maria Adriana Canas Mendes de Almeida Cardoso

Dezembro de 2020

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar à Doutora Dália Loureiro o excelente acolhimento que me concedeu no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a sua sábia, atenta e disponível orientação durante 10 meses de estágio em que me fui progressivamente inteirando das bases científicas e técnicas que permitem estruturar a avaliação e a monitorização das instalações elevatórias e que me facilitou o acesso aos dados das entidades gestoras sobre os quais realizei os estudos de caso.

Quero agradecer muito reconhecido à Professora Doutora Dídia Covas que, no âmbito da disciplina de Hidráulica I, Hidráulica II e de Estruturas e Aproveitamentos Hidráulicos do curso de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico me fez descobrir a importância dos sistemas de abastecimento de águas e de águas residuais, absolutamente determinante na civilização contemporânea, e me revelou o papel central das instalações elevatórias, as quais acabei por escolher como tema de estudo para a minha dissertação de mestrado. Agradeço-lhe, não apenas as suas aulas tão inspiradoras, como a orientação que me prestou em todo o processo de trabalho e me permitiu levar a bom termo o presente estudo.

Quero agradecer aos meus pais, ambos engenheiros, que desde sempre me fizeram confiar na ciência e na técnica e que me formaram nos valores do respeito, da solidariedade e do conhecimento. Agradeço também às minhas avós Gertrudes e Isabel, que sempre me ouviram, estimularam e acarinharam e aos meus avôs, António José, Emílio Rui e Fernando que sempre me incentivaram a ir mais longe, manifestando confiança mas minhas potencialidades.

Quero agradecer aos meus colegas do Instituto Superior Técnico e aos meus amigos de escola.

Finalmente agradeço à minha equipa de rugby, o clube de rugby do técnico, em especial ao capitão Gonçalo, também ele engenheiro civil, que há 14 anos me acompanham em tantos desafios.

RESUMO

O objetivo da presente pesquisa é o desenvolvimento e a aplicação de uma metodologia de avaliação da eficiência energética de instalações elevatórias (IE) em sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais. A metodologia desenvolvida baseia-se na análise de dados disponíveis associados às características das instalações elevatórias (e.g., número de bombas, caudal/ altura de elevação nominal, potência instalada) e condições de operação (e.g., caudal, altura de elevação, consumo de energia). Para a realização do diagnóstico propõem-se três categorias de indicadores de desempenho (ID) relativos à eficiência energética, ao desempenho técnico e ao custo operacional de instalações elevatórias. São também estabelecidas diferentes medidas de melhoria (infraestrutura, operação, manutenção, outras) para melhorar a eficiência energética. A metodologia proposta desenvolve-se em cinco etapas principais: 1. Estabelecimento de indicadores de desempenho; 2. Recolha de dados e cálculo de indicadores de desempenho; 3. Diagnóstico e identificação de prioridades; 4. Estudo de medidas de melhoria; 5. Análise económica. A metodologia é aplicada às IE de três estudos de caso, pertencentes a três entidades gestoras, correspondendo a uma amostra de 221 IE, considerada representativa das IE dos sistemas portugueses de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais. A análise permitiu a identificação de problemas específicos em cada IE e também a identificação de medidas de melhoria, referentes, nomeadamente ao funcionamento de bombas no ponto de máxima eficiência, à instalação de variadores de velocidade, à melhoria do sistema de monitorização e ao registo de dados, à reabilitação ou substituição de bombas ou seus componentes e à manutenção das bombas. Adicionalmente, é realizada uma análise detalhada das cinco IE menos eficientes de cada entidade e com maior potencial de redução do consumo de energia. Verificou-se que as instalações elevatórias de abastecimento de água têm normalmente maior potência instalada, maior consumo de energia e os dados disponibilizados são mais confiáveis e precisos. Pelo contrário as instalações elevatórias de águas residuais têm baixa potência instalada, um mais baixo consumo de energia e, em muitos casos, os dados de monitoramento não se revelam fiáveis.

Palavras-chave: Instalação elevatória, eficiência energética, entidade gestora, indicador de desempenho, abastecimento de água, águas residuais.

ABSTRACT

The aim of the current research is the development and application of a methodology for the energy efficiency assessment of pumping stations (PS) in water supply and waste water systems. This methodology is based on the analysis of available data associated to the pumping stations characteristics (e.g., number of pumps, rated discharge/head, installed power) and operating conditions (e.g., discharge, head, energy consumption). Three categories of key-performance indicators (KPI) related to the energy efficiency, technical performance and operating cost of the pumping stations are proposed to carry out the diagnosis. Different improvement measures (infrastructural, operation, maintenance, others) are established for improving energy efficiency. The proposed methodology is composed of five main steps: 1. Key-performance indicators establishment; 2. Data collection and KPI calculation; 3. Diagnosis and priority identification; 4. Improvement measures analysis; 5. Economic analysis. The methodology is applied to the PS of three case studies, each associated with a different utility, corresponding to a sample of 221 PS, considered representative of the water and waste water PS in Portugal. This allowed the identification of specific problems in each PS and also the identification of improvement measures, namely, operation of electric pumps at the maximum efficiency point, installation variable speed drives, improving the monitoring and data recording system, rehabilitation or replacement pumps or their components and pump maintenance. Additionally, a detailed analysis is carried out to the five least efficient PS of each utility, with higher potential for reducing energy consumption. Water supply pumping stations have typically higher installed power, higher energy consumption and more reliable and accurate available data, unlike wastewater pumping stations which have low installed power, low energy consumption and, often, unreliable monitoring data.

Keywords: Pumping station, energy efficiency, utility, water supply, waste water, performance indicators.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS ..... **IV**

RESUMO ..... **V**

ABSTRACT ..... **VI**

ÍNDICE ..... **VII**

LISTA DE ABREVIATURAS ..... **XIV**

LISTA DE SÍMBOLOS ..... **XV**

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1 ENQUADRAMENTO 1

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA 1

1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO 2

2 ESTADO DA ARTE **4**

2.1 NOTA INTRODUTÓRIA 4

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE BOMBEAMENTO, EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E INSTALAÇÃO HIDRÁULICA 6

2.2.1 As unidades de bombeamento *6*

2.2.2 Equipamentos elétricos *9*

2.2.3 A instalação hidráulica *12*

2.2.4 Válvulas e equipamentos acessórios *15*

2.3 DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS E PRÁTICAS PARA INSTALAÇÃO 16

2.3.1 Dimensionamento de instalações elevatórias *16*

2.3.2 Associação de bombas numa instalação elevatória *20*

2.3.3 Práticas recomendáveis na instalação de sistemas de elevação *22*

2.4 DIAGNÓSTICO DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS 24

2.4.1 Fatores que influenciam o desempenho dos grupos eletrobomba *24*

2.4.2 Instrumentos para diagnóstico *26*

2.5 MEDIDAS PARA MELHORIA DE EFICIÊNCIA DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS 29

2.6 LACUNAS DE CONHECIMENTO 31

3 METODOLOGIA PROPOSTA **32**

3.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA 32

3.2 ETAPA 1: IDENTIFICAÇÃO E CÁLCULO DE INDICADORES DE DESEMPENHO 32

3.3 ETAPA 2: RECOLHA E PROCESSAMENTO DE DADOS ORIENTADA PELOS INDICADORES 34

3.4 ETAPA 3: DIAGNÓSTICO E IDENTIFICAÇÃO DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS PRIORITÁRIAS 38

3.4.1 Avaliação da eficiência *38*

3.4.2 Identificação de prioridades de intervenção nas instalações elevatórias *38*

3.4.3 Análise de fatores que condicionam o desempenho das instalações elevatórias 39
3.5 Etapa 4: Estabelecimento de medidas de melhoria da eficiência 40
3.6 Etapa 5: Análise económica 42
3.6.1 Cálculo dos custos no ciclo de vida de uma IE 42
3.6.2 Cálculo de indicadores económicos 44
4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO E PRIORIZAÇÃO 46
4.1 Descrição dos casos de estudo 46
4.2 Caso de estudo da entidade gestora A 46
4.2.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias 46
4.2.2 Propostas de medidas de melhoria 49
4.3 Caso de estudo da entidade gestora B 51
4.3.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias 51
4.3.2 Propostas de medidas de melhoria 53
4.4 Caso de estudo da entidade gestora C 55
4.4.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias 55
4.4.2 Propostas de medidas de melhoria 57
4.4.3 Substituição da IE 5.2 59
4.5 Síntese de resultados 61
5 ANÁLISE DE FATORES QUE CONDICIONAM O DESEMPENHO DAS INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS 63
5.1 Nota introdutória 63
5.2 Análise global das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água 63
5.3 Análise global das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais 70
5.4 Síntese de resultados 75
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 77
6.1 Principais conclusões do trabalho 77
6.2 Recomendações para as entidades gestoras 78
6.3 Recomendações de trabalhos futuros 79
7 BIBLIOGRAFIA 80
8 ANEXOS 83
8.1 Anexo A 83
8.2 Anexo B 86
8.3 Anexo C 89

Lista de Quadros

Quadro 2.1 Direção do escoamento em bombas centrífugas (Santos et al. 2018) 7

Quadro 2.2 Rendimentos e potências características da operação de uma eletrobomba 10

Quadro 2.3 Perda de carga unitária e singular (Quintela, 1981) 14

Quadro 2.4 Definição das regiões de operação 28

Quadro 2.5 Tolerância de erro correspondente ao grau de aceitação 2B 29

Quadro 3.1 Identificação de indicadores desenvolvidos para apoio à análise 32

Quadro 3.2 Informação fornecida pelas entidades gestoras para conjuntos de grupos com características semelhantes e que pertencem à mesma instalação elevatória 34

Quadro 3.3 Variáveis resultantes do processamento de dados 34

Quadro 3.4 Normas adotadas na dissertação 38

Quadro 3.5 Modelo de “quadro” com a identificação das instalações elevatórias prioritárias 39

Quadro 3.6 Medidas de melhoria/critérios de seleção 40

Quadro 4.1 Instalações elevatórias analisadas em cada entidade gestora 46

Quadro 4.2 Instalações identificadas como prioritárias em AA na da entidade gestora A 48

Quadro 4.3 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias em AA e AR na entidade gestora A 50

Quadro 4.4 Instalações identificadas como prioritárias em AA da entidade gestora B. 53

Quadro 4.5 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias na da entidade gestora B . 54

Quadro 4.6 Instalações identificadas como prioritárias em AA da entidade gestora C. 57

Quadro 4.7 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias para a entidade gestora C. 58

Quadro 4.8 Soluções de grupos eletrobomba para a substituição dos existentes na IE5.2 da entidade gestora C. 60

Quadro 4.9 Análise económica das soluções propostas para a substituição da IE 5.2 da EG C 61

Quadro 5.1 Média da taxa de degradação por intervalo de idade 69

Quadro 8.1 Dados utilizados para análise de desempenho das IE para a EG-A, EG-B e EG-C 83

Lista de Figuras

Figura 2.1 Instalação elevatória com bombas centrífugas (ADVANTEC, 2020). 6

Figura 2.2 Bomba centrífuga: (a) submersível; (b) de eixo horizontal; (c) de eixo vertical, adaptado de (Grundfos, 2020) 8

Figura 2.3 Bomba submersível de águas residuais Fonte: (KSB, 2020) 8

Figura 2.4 Representação das diferentes fases da potência presentes numa IE (Carvalho, 2019) 9

Figura 2.5 Classes de eficiência adaptado de (Santos et al. 2018) 10

Figura 2.6 Curva do motor de uma bomba (Grundfos, 2020) 11

Figura 2.7 Configuração de um variador de frequência (Santos et al. 2018) 12

Figura 2.8 Variação de potência elétrica para controlar o caudal (Santos et al. 2018) 12

Figura 2.9 Variação do NPSH requerido e admissível em função do caudal adaptado de (Michael Smith Engineers 2020) 13

Figura 2.10 Curva característica do sistema adaptado de (Grundfos 2019) 15

Figura 2.11 Alterações na curva do sistema, causado por uma válvula de regulação (Hydraulic Institute, 2017) 15

Figura 2.12 Curvas características do sistema e da bomba-ponto de funcionamento da bomba (Sousa, 2001) 17

Figura 2.13 Curvas características da Bomba KSB Etanorm, para diferentes diâmetros do impulsor (KSB, 2020) 17

Figura 2.14 Exemplo do efeito da variação da velocidade de rotação numa bomba centrífuga (Gutai, 2015) 18

Figura 2.15 Exemplo da influência da forma do impulsor no andamento da curva (Carvalho, 2019) .. 18

Figura 2.16-Curvas características de uma bomba (KSB, 2020) 19

Figura 2.17 Associação de bombas iguais em série (Monachesi, 2005). 20

Figura 2.18 Instalação de bombas iguais em paralelo (Monachesi, 2005). 21

Figura 2.19 Instalação de duas bombas em paralelo diferentes, com curvas estáveis (Monachesi, 2005). 21

Figura 2.20 Eficiências η de bombas de alta pressão multiestágio em função da velocidade específica n_s (KSB, 2020) 26

Figura 2.21 Pontos de funcionamento ao longo da curva Q-H (Ferman, 2015) 28

Figura 2.22 Variação do ponto de funcionamento de uma bomba (Bosserman, 2004). 30

Figura 2.23 Evolução da eficiência de um grupo eletrobomba com e sem manutenção regular (EC, 2001). 30

Figura 3.1 Representação esquemática da consulta de um catálogo 35

Figura 3.2 a) Exemplo de curvas de características Q-H, Q-η e Q-η_g ; b) Exemplo das especificações de uma bomba apresentadas nos catálogos dos fabricantes (Grundfos, 2020) 37

Figura 3.3 Menu principal para introdução de dados no software Easyselect KSB para o dimensionamento da IE 41

Figura 4.1 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR. 47

Figura 4.2 Distribuição da potência elétrica instalada (P1) das IE da entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR 47

Figura 4.3 Medidas de intervenção propostas para a entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR 51

Figura 4.4 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR. 51

Figura 4.5 Distribuição da potência elétrica P1 das IE da entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR. 52

Figura 4.6 Medidas de intervenção propostas para a entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR 55

Figura 4.7 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora C de: (a) AA e (b) AR. 55

Figura 4.8 Distribuição da potência elétrica P1 das IE da entidade gestora C de: (a) AA e (b) AR. 56

Figura 4.9 Medidas de intervenção propostas para EG-C de: (a) AA e (b) AR 59

Figura 5.1 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água por: a) consumo de energia por intervalo de potência b) Quantidade de IE por intervalo de potência 64

Figura 5.2 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética para: a) consumo energético b) Quantidade de IE 64

Figura 5.3 Variação do rendimento global e ótimo por classe de potência em IE de sistemas de abastecimento de água 65

Figura 5.4 Distribuição das instalações elevatórias nos sistemas de abastecimento de água, por nível de desempenho de Q/Qn para cada intervalo de potência 66

Figura 5.5 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo níveis de desempenho em termos de Q/Qn 66

Figura 5.6 Variação do rendimento global relativamente ao rendimento ótimo com o rácio Q/Qn em instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água 67

Figura 5.7 a) Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo : a) vida residual das IE; b) taxa de degradação anual 68

Figura 5.8 Evolução da taxa de degradação anual em função da idade das EE 68

Figura 5.9 Distribuição de instalações elevatórias em sistemas de abastecimento de água por marca 69

Figura 5.10 Mediana dos rendimentos estimados para as três principais marcas presentes na análise 70

Figura 5.11 Mediana dos rendimentos estimado e ótimo para marcas com potências maiores que 10 kW 70

Figura 5.12 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água por: a) consumo de energia por intervalo de potência b) Quantidade de IE por intervalo de potência 71

Figura 5.13 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética para: a) consumo energético b) Quantidade de IE 71

Figura 5.14 Variação do rendimento global e ótimo por classe de potência em IE de sistemas de águas residuais 72

Figura 5.15 Distribuição das instalações elevatórias nos sistemas de águas residuais, por nível de desempenho de Q/Qn para cada intervalo de potência 73

Figura 5.16 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo níveis de desempenho em termos de Q/Qn 73

Figura 5.17 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo : a) vida residual das IE; b) taxa de degradação anual 74

Figura 5.18 Distribuição de instalações elevatórias em sistemas de águas residuais por marca 74

Figura 5.19 Mediana dos rendimentos globais correspondentes às marcas M1 e M3 por intervalo de potência. 75

Figura 5.20 Mediana do rendimento global e ótimo para as marcas M1 e M3 no intervalo de potência maior que 10 kW 75

Figura 8.1 Cash Flow da análise comparativa entre a solução 1.3 e 2.3 89

Figura 8.2 Cash Flow da análise comparativa entre a solução 1.5 e 2.5 89

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Abastecimento de água
ANSI	American National Standards Institute
AR	Águas residuais
BEP	Ponto de melhor eficiência, Best Efficiency Point
Cap	Capitação
CCB	Curva característica da bomba
CCS	Curva característica do sistema
DR	Decreto Regulamentar
EEAA	Estação elevatória de águas de abastecimento
EEAR	Estação elevatória de águas residuais.
EG	Entidade gestora
ERSAR	Entidade reguladora dos serviços de águas e resíduos
ID	Indicadores de desempenho
IE	Instalação elevatória
ISO	International Organization for Standardization
SS	Sub sistema
VV	Variador de velocidade

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Grandeza	Unidades/Dimensões
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
CCV	Custo do ciclo de vida	€
P_p	Potencial de poupança	€
P_e	Poupança energética	€
C_{ue}	Custo unitário da energia	€/kWh
C_e	Custo da energia	€
C_{ic}	Custo do investimento inicial	€
CE	Consumo de energia	kWh
E_u	Energia útil	kWh
E_c	Energia anual consumida	kWh/ano
$H_m\ ou\ H_t$	Altura manométrica ou total da Instalação	m
H_g	Altura geométrica	m
ΔH	Perda de carga	m
H_s	Altura de aspiração	m
Z_r	Cota do reservatório	m
NPSH	Carga absoluta útil na aspiração	m
$NPSH_d$	Carga absoluta útil na aspiração disponível	m
$NPSH_r$	Carga absoluta útil na aspiração requerida	m
Z_{ie}	Cota da instalação elevatória	m
P_h	Potência hidráulica, potência de escoamento	kW
P_1	Potência absorvida pelo motor	kW
P_2	Potência absorvida pela bomba	kW
Q	Caudal de operação	m^3/h ou l/s
n_s	Velocidade de rotação específica	s^{-1}, min^{-1}
Q_n	Caudal nominal	m^3/h ou l/s
η_0	Rendimento ótimo	(%)
η_g	Rendimento global	%
η_e	Rendimento esperado	%
η_m	Rendimento do motor	%
$\forall_a$	Volume anual	m^3/ano
VR	Vida residual	
VU	Vida útil	anos
I	Idade da instalação elevatória	anos
D_a	Degradação anual	%/ano
t_f	Tempo de funcionamento	horas

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A água é um recurso vital para as sociedades humanas e colocá-la em permanência à disposição de todos foi desde sempre uma preocupação central em todas as civilizações. Quando, em tempos remotos, as técnicas de captação e distribuição de água não se encontravam dominadas, o acesso a fontes naturais de água potável, bem como a disponibilidade de água para uso pessoal, para a agricultura ou para a criação de animais, condicionou a ocupação dos espaços e a circulação dos grupos humanos. Pode considerar-se que os progressivos avanços na descoberta dos procedimentos de captação e de transporte do precioso líquido para o tornar disponível nas diferentes situações que a vida requer, ou as invenções que possibilitaram a drenarem de zonas excessivamente alagadas ou contaminadas, constituíram marcos civilizacionais relevantes (Cunha, 2002).

A civilização contemporânea dispõe em grande parte dos países desenvolvidos condições e recursos que permitem a disponibilização de água em praticamente todos os locais onde os seres humanos se encontrem. No século XXI, o abastecimento de água devidamente tratada às habitações, ou a qualquer local em que as atividades se exerçam, assim como a drenagem de águas residuais, são encarados como um bem público tão indispensável, tão básico e tão naturalmente acessível, que, em muitos casos, o cidadão comum não se apercebe, nem valoriza devidamente o conhecimento científico, os equipamentos (e.g., Instalações elevatórias), os procedimentos técnicos e o esforço económico que o permitem.

No setor das águas urbanas, as instalações elevatórias são pontos fulcrais nos sistemas de captação, de transporte, de distribuição e de drenagem da água. Funcionando em permanência, exigem uma conceção estrutural, montagem e dimensionamento rigorosos. Também requerem diagnósticos, avaliações e auditorias periódicas, que recorram a metodologias corretas, para assegurar um funcionamento eficiente e energeticamente sustentável. Consomem uma importante parcela do consumo energético nacional, cerca de 2% e cerca de 4% do consumo mundial, e representam cerca de 65% do consumo no setor das águas urbanas. Atualmente, grande parte das instalações elevatórias opera com níveis insatisfatórios de eficiência energética, tornando-se por isso urgente para as entidades gestoras de água definir estratégias melhoria. (Santos et al., 2018).

1.2 Objetivos e metodologia

O presente estudo tem como objetivo o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia de diagnóstico e de avaliação do desempenho de instalações elevatórias (IE). Esta metodologia tem por base o cálculo de um conjunto de indicadores de desempenho e permite detetar e analisar questões de eficiência global, identificar prioridades de intervenção e orientar intervenções para melhorar o desempenho, reduzir custos energéticos e assegurar sustentabilidade.

O estudo fundamenta-se na análise do atual estado da arte, considerando o dimensionamento das IE, as condições de implantação e a sua integração nos sistemas de distribuição de água para abastecimento e de águas residuais, a estrutura e componentes que as integram, os fatores que influenciam, positiva ou negativamente o seu desempenho e, ainda, as medidas que comprovadamente asseguram a sua melhoria. Construiu-se, posteriormente, uma metodologia para diagnóstico e apoio na seleção de medidas de melhoria de eficiênca energética, selecionando e estruturando indicadores de desempenho, considerados como mais relevantes para orientar a recolha e o processamento de dados, a respetiva análise e permitir o diagnóstico e a avaliação de desempenho, fundamentados e rigorosos. A metodologia inclui ainda a identificação de priorizações na intervenção, a identificação de medidas de melhoria e recomendações para a respetiva implementação e análise económica.

A metodologia foi aplicada em três casos de estudo, selecionados no âmbito do projeto Avaler+ "Avaliação da eficiência e sustentabilidade energética nos serviços urbanos de águas" (www.avaler.lnec.pt) que tem como objetivo principal estabelecer um quadro de referência claro, integrador e de aplicação simples para avaliação do desempenho energético, para apoiar a tomada de decisão e a monitorização do impacto de medidas de eficiência energética nas entidades gestoras (EG) dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de água residual e pluvial.

1.3 Estrutura e organização do relatório

No Capítulo 2, inicialmente é apresentada uma breve nota de contextualização e enquadramento histórico, que aborda a evolução das técnicas e soluções de bombeamento de água desde as soluções tradicionais às mais modernas. Seguidamente é efetuado o estado da arte nos diferentes domínios que afetam o desempenho de instalações elevatórias em sistemas de abastecimento de águas e drenagem de águas residuais, apresentando a informação científica e técnica mais relevante na fundamentação do estudo. As instalações elevatórias alvo de análise neste estudo são equipamentos incorporados em redes de distribuição de água e de drenagem urbana de águas residuais (unitários, separativos ou pseudo-separativos) e pluviais (embora seja menos comum neste tipo de sistemas). São apresentados os vários tipos de bombas, de motores e variadores de velocidade que melhor servem o propósito de assegurar eficiência às unidades de bombeamento, informação acompanhada por uma análise de fatores que podem influenciar negativa ou positivamente o desempenho dos grupos eletrobomba. Descritos os equipamentos e as particularidades do respetivo funcionamento e da sua adequação às diferentes situações, são referidos os procedimentos recomendados para avaliar o desempenho dos circuitos hidráulicos e dos grupos eletrobomba, incluindo testes de desempenho com referência aos diferentes graus de aceitação e tolerância. No âmbito da exploração, identificam-se os fatores que influenciam o desempenho das instalações elevatórias e, com base nessa informação, referem-se intervenções de manutenção e substituição adequados para melhorar o desempenho e prolongar a durabilidade dos equipamentos. Dado que as auditorias representam modos de transferência do conhecimento teórico para a prática, recorreu-se a muita informação recolhida em relatórios de auditoria para estruturar o estado da arte. A completar a informação apontam-se tipos de medidas de melhoria que, na sequência de diagnóstico, avaliação ou auditorias, podem ser introduzidas em

instalações elevatórias, com um destaque especial às referentes a procedimentos de manutenção e ao balanço energético, uma vez que o consumo energético constitui a parcela (podendo alcançar 90%) com maior peso nos custos de exploração de instalações elevatórias.

As diferentes dimensões da informação requerida permitiram elaborar uma metodologia para diagnóstico e avaliação da eficiência energética em instalações elevatórias, apresentada no Capítulo 3. Essa metodologia estrutura-se de acordo com as seguintes etapas: 1) Identificação e cálculo de indicadores de desempenho; 2) Recolha e processamento de dados; 3) Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias; 4) Estabelecimento de medidas de melhoria de eficiência 5) Análise económica.

A metodologia é aplicada a estudos de caso no terceiro capitulo. Neste capítulo, é ilustrada a forma como a metodologia permite efetuar o diagnóstico e a avaliação de instalações elevatórias de entidades gestoras (EG), responsáveis pela captação, adução e distribuição de água para consumo público e pela recolha e transporte de águas residuais. Tratando-se de entidades que participam no projeto Avaler+, da responsabilidade do LNEC, foi possível ter acesso aos seus dados e trabalhá-los, assumindo margens de erro reduzidas, com a garantia de que apresentam consistência. Os estudos de caso permitiram analisar os fatores que influenciam a eficiência e a eficácia das instalações elevatórias, identificar e analisar propostas de medidas de melhoria e estabelecer prioridades de intervenção, o que se descreve no Capítulo 4. Alguns dos fatores mais relevantes que afetam o comportamento das instalações elevatórias referem-se à sua eficiência energética, pelo que esta dimensão constitui um dos aspetos de análise mais detalhada, apresentada no Capítulo 5.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões e recomendações para os casos de estudo e para trabalhos futuros,

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Nota introdutória

A água é absolutamente vital tanto para os seres humanos. Desde a mais remota pré-história que a presença ou ausência de água potável condicionou a circulação e a fixação dos grupos humanos nos diferentes espaços do planeta terra. Muito cedo na história da humanidade, pelo menos desde a Idade do Bronze (3.300 -1100 a.C.), que se engendraram processos para captação de água da chuva, com armazenamento em cisternas, e para captação de água subterrânea através da abertura de poços (Scholz, 2015).

Nas antigas civilizações, os aglomerados urbanos formavam-se predominantemente na imediação de fontes naturais de água e ao nível do mar (Scholz, 2015). No entanto, desde a mais remota antiguidade, foram surgindo meios de elevação de água, como o dispositivo *shaduf*, inventado na Mesopotâmia (4000-2000 a.C.), para elevar água de poços, rios, cisternas ou canais, e aperfeiçoado no Egipto, permitindo ampliar em cerca de 10% a área de cultivo junto das margens do Nilo, ou a roda de água vertical igualmente usada pelos egípcios, ou ainda os dispositivo *mohte, raha* e *sakkia*, que recorriam à energia animal e foram concebidos na Pérsia entre 1200-e 200 a.C.. Também nas dinastias chinesas mais antigas se criaram dispositivos notáveis, como o *lùlu,* inventado por volta de 700 a.C., que elevava água de poços profundos. Na Grécia do período clássico surgiu o *parafuso hidráulico sem fim*, o primeiro tipo de bomba de deslocamento, descrito por Arquimedes (287-212 a.C.), conhecido pelo parafuso de Arquimedes. Método ainda utilizado nos dias de hoje, após aperfeiçoamentos realizados nos Países Baixos, durante a década de 1970. Na época helenística, Fílon de Bizâncio (280-220 a.C.) desenvolveu uma técnica elegante de elevação de água, aproveitando a força induzida pela corrente dos rios e Ctesíbio de Alexandria (285-222 a.C.) inventou a primeira bomba de força de que há notícia (Scholz, 2015).

Entre os séculos IV e II a.C., nas civilizações helénicas, o paradigma de localização dos aglomerados humanos foi-se alterando, com a construção de povoações e o cultivo de terrenos em zonas elevadas, para dificultar ataques e pilhagens por parte de invasores. Com a atividade agrícola distante das fontes naturais de água, restava apenas uma solução: o desenvolvimento de técnicas de captação, condução e elevação da água. A economia da água ganha desta forma uma nova importância. Até então o transporte de água era assegurado pela gravidade e, para casos de distâncias mais longas, por aquedutos (que se multiplicaram mais tarde na época romana). Para a civilização helénica, foi necessário elevar a água, ou seja, introduzir-lhe energia. Como na época não eram ainda conhecidos os combustíveis fósseis, surgiram dispositivos mecânicos operados manualmente ou acionados por forças naturais, como o vento (Scholz, 2015).

No período Romano, surgiu a *eolípila,* ou motor de Heron (século I d.C.), que, numa combinação mecânica com a bomba de Ctesíbio, deu origem a uma primeira bomba de água a vapor, quase dois milénios antes da revolução industrial. No domínio da invenção de sistemas de bombeamento, a China

também marcou pontos com a invenção de uma bomba usada intensamente para irrigação drenagem e abastecimento de água durante as dinastias Tang (618 – 907) e Song (960–1279).

No período Bizantino (395-1453) desenvolveram-se os primeiros moinhos de vento para automatizar o bombeamento de água e, também, a moagem de grãos de cereais (Scholz, 2015).

No final do século XVIII, James Watt revolucionou por completo a bombeamento da água ao inventar o motor a vapor. No século XIX, o rápido desenvolvimento da população urbana e da indústria trouxeram consigo novos problemas, cuja solução seria impossível sem o recurso a bombeamento de água. A procura estimulou a produção de bombas com motores térmicos e elétricos, gerando-se indústrias importantes para os produzir. O valor deste tipo de equipamentos não parou de crescer, procurando-se continuamente alternativas para melhorar o seu desempenho e para as tornar mais robustas, eficientes e económicas (Scholz, 2015).

As instalações elevatórias cuja metodologia de diagnóstico constitui objeto central deste estudo são atualmente os centros nevrálgicos dos sistemas públicos de água sobre os quais assenta a civilização contemporânea. A Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) classifica os sistemas públicos de águas em: sistemas de abastecimento público e sistemas de águas residuais.

A atividade de abastecimento público de água compreende a captação, o tratamento, a elevação, o transporte, o armazenamento, a distribuição e a utilização da água. Nesta atividade, designam-se por sistemas em alta os constituídos por um conjunto de componentes (e.g., condutas) a montante da rede de distribuição, que asseguram a ligação do meio hídrico ao sistema em baixa. Por sua vez, os sistemas em baixa são constituídos por um conjunto de componentes (e.g., instalações elevatórias) que permitem prestar aos consumidores o serviço de abastecimento de água. Os sistemas podem ser integrados quando a ligação entre o meio hídrico e o consumidor é assegurada pelo mesmo sistema (ERSAR, 2020).

A atividade de saneamento de águas residuais urbanas compreende a descarga, a drenagem, a elevação, o transporte e o tratamento das águas residuais de origem urbana, bem como a sua rejeição no meio hídrico. Esta atividade é fundamental para garantir a salvaguarda da qualidade das massas de água, sendo determinante no condicionamento dos outros usos do domínio hídrico, designadamente a captação de água para consumo humano. O sistema de saneamento de águas residuais em baixa assegura a drenagem de águas residuais urbanas junto ao produtor, rejeitando-as num sistema em alta, ou, caso se trate de um sistema integrado, rejeitando-as em destino final adequado. Um sistema em alta é constituído por um conjunto de componentes (e.g., coletores) que permite a ligação do sistema em baixa ao ponto de rejeição (ERSAR, 2020).

As instalações elevatórias são equipamentos essenciais que se encontram incorporados tanto nos sistemas de abastecimentos público das águas, como nos sistemas de águas residuais. Têm a função de fornecer energia ao fluido, de modo a permitir a sua condução vencendo desníveis topográficos e mantendo níveis de pressão e caudal adequados às exigências do consumo. Qualquer instalação

elevatória inclui necessariamente duas partes: a unidade de bombeamento, constituída pelo grupo bomba-motor; a instalação hidráulica constituída pelo conjunto de tubagens, órgãos de manobra e acessórios Stoffel (2015), conforme o representado na Figura 2.1.

Figura 2.1 Instalação elevatória com bombas centrífugas (ADVANTEC, 2020).

A experiência mostra que falhas nos sistemas de bombeamento têm muitas vezes origem, não na própria bomba, mas nas tubagens, na placa de instalação, na configuração de instalação ou na solidez das fundações, domínios frequentemente negligenciados. Torna-se, por isso, indispensável que aos tópicos “não bomba” seja conferida a atenção que requerem (Heinz e Budris, 2015).

2.2 Caracterização das unidades de bombeamento, equipamentos elétricos e instalação hidráulica

2.2.1 As unidades de bombeamento

A unidade de bombeamento é um equipamento que tem como função converter energia elétrica em energia hidráulica, introduzindo movimento e pressão ao fluido.

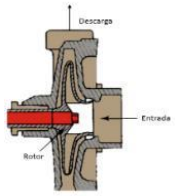
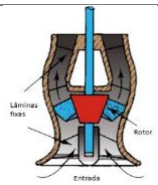
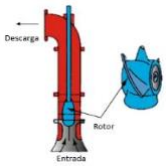
Tanto nas redes de distribuição, como na drenagem de águas residuais, a seleção da bomba mais adequada é crucial pois em grande medida dela depende a eficiência e a fiabilidade do sistema. A seleção deve partir de um conhecimento aprofundado das tipologias e características das bombas centrífugas, pois são as mais utilizadas nas IE (Santos et al. 2018) assim como das necessidades de elevação do sistema (i.e., desnível topográfico e características da conduta elevatória).

As bombas centrífugas caraterizam-se pela movimentação do fluido que ocorre pela ação das forças que se desenvolvem na massa líquida, provocadas pela rotação de um veio. Este veio tem acoplado um disco (rotor, impulsor) dotado de pás (palhetas, hélice), que recebe o fluido pelo seu centro e, pela ação da força centrífuga, o expulsa pela periferia.

No caso das bombas centrífugas de deslocamento positivo, ou de bombas volumétricas, a movimentação do fluido é causada diretamente pela ação de um dispositivo mecânico da bomba que obriga o fluido a um movimento na direção do deslocamento a que está sujeito este dispositivo (êmbolo, engrenagens, lóbulos, palhetas). Este tipo de bomba designa-se por volumétrica porque o fluido ocupa e desocupa espaços no interior da mesma, de forma sucessiva, com volumes determinados.

Conforme a direção do escoamento que produzem, as bombas centrífugas podem classificar-se em três tipos: bombas de fluxo radial, de fluxo axial e de fluxo misto. No Quadro 2.1 é descrito cada um dos tipos.

Quadro 2.1 Direção do escoamento em bombas centrífugas (Santos et al. 2018)

Direção do escoamento	Esquema ilustrativo
Bomba de fluxo radial: Estas bombas são também designadas por bombas centrífugas. A água passa pela bomba através de uma entrada junto ao veio do rotor, sendo de seguida dirigida para a periferia a grande velocidade, devido à força centrífuga gerada pelo rotor em movimentação. Estas bombas destinam-se à movimentação de líquidos, em geral, a alturas manométricas elevadas e são, por isso, o tipo de bomba mais utilizado nas instalações elevatórias. Quando a pressão a ser gerada for muito elevada, estas podem apresentar vários rotores instalados em série sobre o mesmo veio, designando-se por bombas de andares ou bombas multicelulares.	
Bomba de fluxo axial: A movimentação da água faz-se no sentido do eixo do rotor. O rotor assemelha-se a uma hélice, sendo por isso conhecida também por bomba axial ou de hélice. A sua aplicação limita-se ao bombeamento de grandes caudais e reduzidas alturas manométricas. Este tipo de bomba é normalmente utilizado em captações de água de superfície com reduzida altura de elevação.	
Bomba de fluxo misto: Estas bombas combinam princípios das bombas radiais e axiais. A movimentação da água é helicoidal. As bombas de eixo prolongado para a extração de água dos furos profundos são geralmente do tipo de fluxo misto e quase sempre multicelulares.	

Se a estação de bombeamento for de uma captação subterrânea, com um grande desnível geométrico entre o nível da água e a superfície, as bombas submersíveis de impulsor vertical (Figura 2.2 a) são a melhor opção. Este tipo de bombas tem a particularidade de ser do tipo multicelular para terem maiores alturas de elevação.

Se a estação de bombeamento estiver localizada numa instalação de armazenamento acima do solo, as bombas centrífugas de caixa dividida (Figura 2.2 b) são mais adequadas. Estas bombas são normalmente horizontais, mas podem ser também verticais (Figura 2.2 c), caso o espaço seja limitado. Acoplamentos flexíveis ligam os eixos da bomba e do motor. O design da bomba de caixa dividida é usado para facilitar a manutenção dos elementos rotativos, que podem ser removidos sem desconectar a tubulação de sucção ou descarga.

Nos projetos tipo de instalações hidráulicas para sistemas de água potável, o corpo da bomba deve ser de ferro fundido e os impulsores de ferro fundido ou aço inoxidável. A base da bomba e do motor deve ser de ferro fundido ou de aço fabricado. O impulsor e o corpo da bomba podem incluir anéis de desgaste, dependendo das especificações do fabricante ou da consideração do custo de substituição dos anéis. As bombas têm vedações mecânicas ou de empanque, rolamentos de esferas ou de roletes e sistema de lubrificação.

As bombas que operam em condições extremas, como nas extremidades das curvas característica da bomba ou em frequente pára-arranca, devem ter selos de vedação, em vez, de selos mecânicos. Os selos mecânicos devem ser considerados em bombas que não sejam usadas durante longos períodos. Devem ser realizadas análises aos parâmetros físico-químicos da água antes da seleção de materiais não-padrão. A lubrificação de bombas horizontais deverá ser feita com óleo ou graxa, a das bombas verticais de fossa seca com graxa e a das bombas verticais de fossa húmida com óleo ou água (Guyer, 2012).

(a) (b) (c)

Figura 2.2 Bomba centrífuga: (a) submersível; (b) de eixo horizontal; (c) de eixo vertical, adaptado de (Grundfos, 2020)

Para a condução das águas residuais encontram-se os seguintes tipos de bombas: submersíveis; de poço seco; auto-ferrantes (Strand, 2020). As bombas submersíveis (Figura 2.3) são especialmente concebidas para funcionar em águas residuais. Um motor fechado e selado permite uma submersão completa, eliminando a necessidade de um poço seco separado, o que diminui os custos de instalação. As bombas submersíveis apresentam normalmente selos mecânicos duplos lubrificados a óleo com sondas sensores de humidade. Uma vez que as bombas submersíveis são instaladas em poços húmidos de águas residuais, o acesso às bombas é limitado e quando é necessário inspecionar ou reparar o equipamento só podem ser removidas através de um sistema de calha guia.

Figura 2.3 Bomba submersível de águas residuais Fonte: (KSB, 2020)

As bombas de poço seco são instaladas ao lado de um poço ou poço húmido. Isto permite a utilização de uma bomba centrífuga não submersível. Podem ser montadas vertical ou horizontalmente, permitindo flexibilidade para restrições de espaço. As bombas de poço seco mantêm a bomba fora das águas residuais, permitindo diagnosticar facilmente uma bomba durante o seu funcionamento. Uma desvantagem da bomba de poço seco é a possibilidade de inundação, que poderá danificar os motores

da bomba. Se o poço seco for suscetível de inundação, uma bomba submersível de poço seco pode ser uma opção. Estas são semelhantes às bombas submersíveis, mas não requerem águas residuais para arrefecer o motor, pois têm motores submersíveis com óleo e/ou camisas de arrefecimento que proporcionam um arrefecimento adequado e seguro, o que lhes confere vantagem dado que em poço seco não há fluido circundante utilizável para arrefecimento.

As bombas auto-ferrantes, de colocação acima do solo, são uma alternativa às bombas submersíveis ou de poço seco. Concebidas para aplicações de elevação por aspiração (como é o caso das instalações elevatórias), primam por extrair ar do lado da aspiração e voltar a descarregá-lo para o poço húmido.

Ao selecionar uma bomba de águas residuais é indispensável considerar as restrições e as características de aplicação requeridas num sistema de bombas. Se a manutenção for o fator determinante, é aconselhável uma instalação auto-ferrante ou em poço seco. Se o custo for um obstáculo, as bombas submersíveis permitirão uma instalação mais compacta. Em qualquer dos casos, é necessário efetuar um balanço entre a eficiência versus a capacidade de manuseamento de sólidos para assegurar um funcionamento a longo prazo e a fiabilidade da estação elevatória.

2.2.2 Equipamentos elétricos

2.2.2.1 Motor

Os motores correspondem ao objetivo de converter a energia elétrica em energia mecânica de rotação induzida à bomba, conversão efetuada pelo acionamento elétrico de uma unidade de bomba constituída por motores e, caso exista, por um variador de frequência, em que a energia mecânica é transmitida à bomba por um eixo rotativo (Stoffel 2015).

A eficiência do motor é descrita pela razão entre P_1 e P_2, em que P_1 é a potência total induzida no sistema de bombeamento, P_2 é a potência que vem do motor para o veio (potência nominal do motor). P_3 é frequentemente omitido, trata-se da potência induzida à bomba através do veio, sabendo que as bombas são acopladas ao motor, P_3 será semelhante a P_2. P_h ou P_4 é a potência hidráulica ou útil, que é a potência fornecida ao escoamento (Grundfos, s/d). Na Figura 2.4 é apresentado esquematicamente cada etapa de transmissão da potência numa IE.

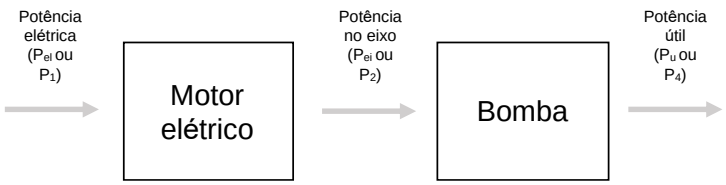


Figura 2.4 Representação das diferentes fases da potência presentes numa IE (Carvalho, 2019)

São referidas as equações dos rendimentos e potências característicos do funcionamento de uma eletrobomba no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 Rendimentos e potências características da operação de uma eletrobomba

Rendimentos e potências características	**Equação de definição**
Rendimento do conjunto motor e variador, η_m	$\eta_m = \frac{P_2}{P_1} \times 100$ (2.1)
Rendimento global do grupo eletrobomba, η_g, que é o resultado da multiplicação entre o rendimento mecânico da bomba η_b com η_m	$\eta_g = \eta_m \times \eta_b$ (2.2)
Potência de entrada no sistema, elétrica, P_{el}, ou P_1 (provém da razão entre a potência de saída ou hidráulica com o rendimento global do sistema)	$P_{el} = \frac{\gamma Q H_t}{\eta_g}$ (2.3)
Potência hidráulica, P_h ou P_4	$P_h = \gamma Q H_t$ (2.4)

Atualmente existem os seguintes tipos de motores: DC convencional; DC com imanes permanentes; de indução com rotor em gaiola de esquilo; de indução com rotor bobinado; síncrono de ímanes permanentes; síncrono com excitação separada; de relutância comutados. Classificam-se em quatro classes de eficiência, ordenados por ordem crescente ao nível da eficiência (Figura 2.5): eficiência standard (IE1); eficiência elevada (IE2); eficiência premium (IE3); eficiência super premium (IE4). A Figura 2.5 apresenta a relação entre eficiência (%) e potência (kW) para cada classe.

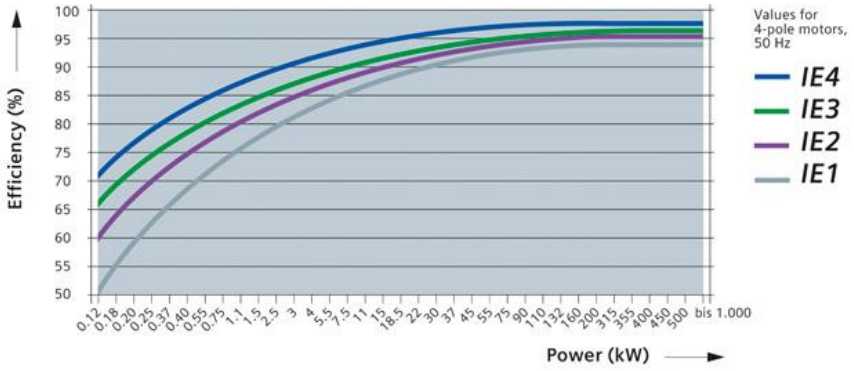


Figura 2.5 Classes de eficiência adaptado de (Santos et al. 2018)

De acordo com o Guia Técnico n.º 24 da ERSAR, as potências entre 7,5 e 375 kW têm de ser de classe mínima IE3, ou de classe mínima IE2, se forem equipados com variador eletrónico de velocidade (Santos et al., 2018).

Na Figura 2.6 é apresentada, a título de exemplo, a curva motor-rendimento (curva eta i) de uma eletrobomba com P_2=15 kW, de classe IE3 e verifica-se que para valores de funcionamento para caudais muito reduzidos, e consequentemente com reduzida potência induzida à bomba P_2 (eixo das abcissas), a eficiência do motor, expressado pela curva motor-rendimento (eta) cai repentinamente. É por isso fundamental escolher sempre um motor adequado às exigências operacionais do sistema.

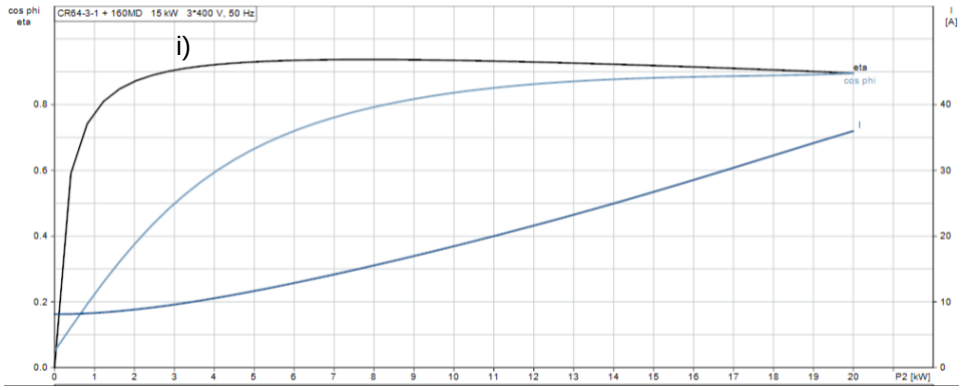


Figura 2.6 Curva do motor de uma bomba (Grundfos, 2020)

Cerca de 90% dos custos totais de uma instalação elevatória ao longo do seu ciclo de vida estão associados ao consumo energético do motor elétrico, estando a restante parcela de custos associada ao investimento inicial e aos custos de manutenção. O investimento em motores de alto rendimento torna-se uma da forma de redução dos custos de energia. Ao apresentar um rendimento superior, o motor assegura uma redução do consumo de energia elétrica e uma diminuição de perdas de energéticas. A redução das perdas permite que os motores funcionem a temperaturas inferiores, o que contribui para o aumento da sua vida útil (Santos et al. 2018).

2.2.2.2 Variador de velocidade

Quando um sistema elevatório está sujeito a variações significativas de caudal e de pressão é conveniente dotar os seus grupos eletrobomba de variadores de velocidade. A instalação deste equipamento permite assegurar pressão constante no sistema elevatório, seja qual for o caudal pedido, o que se traduz numa diminuição da energia consumida. O seu funcionamento exige a inclusão de uma sonda de pressão e um regulador automático, que, em cada instante, emite instruções para ajustar a velocidade de rotação, anulando qualquer afastamento da pressão (Quintela, 1981).

O variador de velocidade, também designado variador de frequência, é um equipamento utilizado para controlar a velocidade de rotação de um motor elétrico alimentado a corrente alterna, controlando a frequência da energia elétrica fornecida ao motor. Trata-se de um tipo específico de acionamento de velocidade ajustável em que o controlo automático de frequência é conseguido graças a um circuito elétrico primário que converte a corrente alterna em corrente contínua, voltando depois a convertê-la em corrente alterna, com a frequência necessária (Figura 2.7). A perda de energia interna no controlo automático de frequência é de ~3%. (Grundfos, s/d).

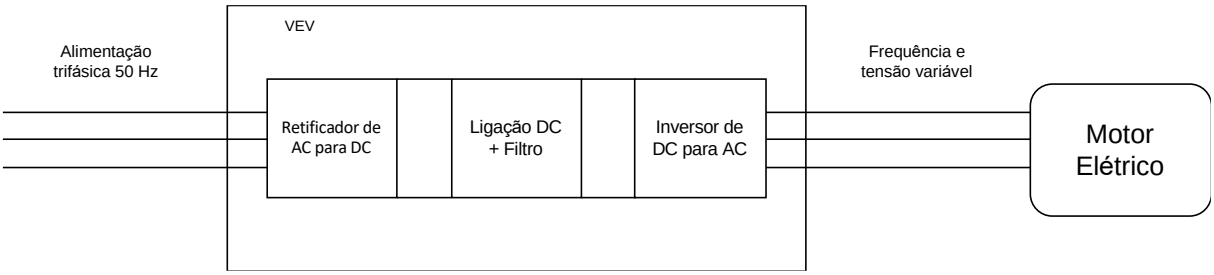


Figura 2.7 Configuração de um variador de frequência (Santos et al. 2018)

A instalação de um variador é recomendado para os motores elétricos que funcionem numa carga variável a menos de 50% da capacidade durante pelo menos 2 000 h por ano (Santos et al., 2018).

Para tirar maior partido de um variador de velocidade convém que este opere entre valores de velocidade nominal de rotação, na ordem dos 50% a 100% (Foray, 2014). Fora destes valores, as perdas energéticas aumentam, deixando se ser recomendável a utilização do variador.

A Figura 2.8 apresenta de forma gráfica a variação de potência elétrica necessária para controlar o caudal de uma bomba.

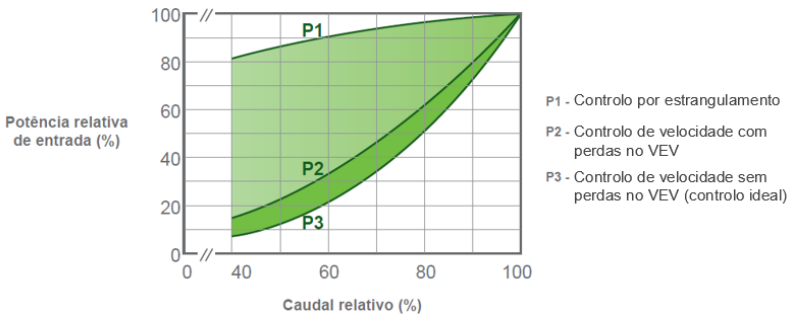


Figura 2.8 Variação de potência elétrica para controlar o caudal (Santos et al. 2018)

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, uma das melhores soluções de poupança energética consiste na instalação de variadores de velocidade (Robert Lax, ITT PRO Services, 2014).

2.2.3 A instalação hidráulica

A instalação hidráulica consiste no conjunto de tubagens, órgãos, acessórios e outros equipamentos que permitem a circulação da água.

As tubagens têm duas funções: conduzir o líquido para o interior da bomba, designando-se por tubagem de aspiração, e direcionar o líquido da bomba para o exterior da bomba, designando-se por tubagem de elevação ou de compressão. As tubagens não devem afetar negativamente o desempenho do sistema, o que em muitos casos não acontece, verificando-se ineficiências nos grupos elevatórios ocasionadas pelo sistema de tubagem adjacente (Heinz e Budris, 2015).

Para um desempenho adequado, as características das tubagens de aspiração têm de assegurar que o NPSH disponível, carga absoluta útil na aspiração disponível na instalação, representado pela equação (2.5), à entrada da bomba seja superior ou igual aquele que se encontra especificado pelo fabricante, NPSH requerido para o caudal elevado, evitando a ocorrência de cavitação e possíveis danos relacionados no impulsor ou no corpo da bomba.

$$NSPH_{disponível} = \frac{p_a}{\gamma} - (h_s + \Delta H) - \frac{t_v}{\gamma} \quad (2.5)$$

sendo p_a, a pressão absoluta na superfície do líquido de alimentação (Pa), h_s, a altura de aspiração dada pela diferença entre a cota da secção da flange de aspiração e o nível do reservatório a montante (m), ΔH, as perdas de carga totais na conduta de aspiração e t_v a tensão de saturação de vapor líquido.

Na Figura 2.9 apresenta-se a variação entre o NPSH disponível, $NPSH_A$, e o requerido pela bomba, $NPSH_R$, para diferentes pontos de caudal e a margem de NSPH de segurança definida em conformidade com a norma ANSI/HI 9.6.1-2012 do *Hydraulic Institute*.

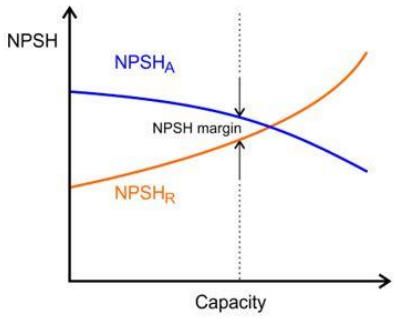


Figura 2.9 Variação do NPSH requerido e admissível em função do caudal adaptado de (Michael Smith Engineers 2020)

Uma tubagem adequada requer a instalação de um tubo retilíneo diretamente ligado à bomba, sem curvas ou acessórios que perturbem o fluxo. A conduta de aspiração deve ter um diâmetro igual ou superior ao diâmetro de entrada na bomba e deve ser respeitada uma velocidade máxima de cerca 2,5 m/s em todo o seu desenvolvimento (Heinz e Budris, 2015).

Caso o dimensionamento da tubagem se revele inadequado podem surgir problemas tais como: ruído; oscilações de carga axial aleatórias; desgaste; cavitação; danos ocasionais de separação do líquido no lado da descarga (Quintela, 1981).

A tubagem de compressão tem como finalidade conduzir a água proveniente da bomba. O seu dimensionamento é geralmente ditado pelas perdas de carga, recomendando-se que a velocidade máxima não ultrapasse 4,5 m/s (Heinz e Budris, 2015).

As bombas de elevada velocidade específica de rotação, são mais sensíveis a acessórios instalados perto da flange de compressão. O fecho súbito das válvulas pode traduzir-se em picos de pressão gerados pelo golpe de ariete que, refletindo-se na bomba, são suscetíveis de lhe ocasionar possíveis

danos. A tubagem de compressão pode ainda afetar o arranque e a paragem da bomba (Heinz e Budris, 2015).

Para se proceder ao cálculo das perdas de carga exemplificado no Quadro 2.3, é necessário distinguir as perdas de carga singulares e as perdas contínuas, sabendo que a sua soma corresponde à perda de carga total (Quintela, 1981). A perda de carga entre duas secções é proporcional à sua distância.

Quadro 2.3 Perda de carga unitária e singular (Quintela, 1981)

Equação da perda de carga unitária	**Equação da perda de carga singular**
$\boldsymbol{J} = \left(\frac{\Delta\left(\frac{p}{\gamma}+z\right)}{L}\right)$ (2.6)	$\Delta H = K(\frac{U^2}{2g})$ (2.7)
Em que p/γ+z representa a cota piezométrica e a distância entre secções. Multiplicando a perda de carga unitária, J, com a distância entre secções, L, obtém-se a perda de carga continua total.	Em que U é uma velocidade referência e K um coeficiente que depende da geometria da singularidade.

Sabendo como se calculam as perdas de carga e conhecendo as restantes caraterísticas do sistema, é possível calcular a altura de elevação total, H_t (2.8), um parâmetro que será fundamental para efetuar o correto dimensionamento da IE. A fórmula usada para este efeito é a seguinte:

$$H_t = H_{geo} + \Delta H \quad (2.8)$$

sendo H_{geo}, o desnível geométrico entre o reservatório a jusante e o de montante (m) e ΔH, as perdas de carga totais no sistema (m).

Quando a instalação elevatória se encontra entre reservatórios, e se conhece as características dos reservatórios e da conduta, é possível construir a curva característica do sistema (Figura 2.10) que, nesse mesmo sistema, traduz, para cada caudal, a altura de elevação necessária(soma da altura geométrica com as perdas de carga no sistema, contínuas e localizadas) (Grundfos 2019). As perdas de carga aumentam com o caudal, sendo a equação (2.9) que descreve a altura de elevação necessária para a instalação a seguinte:

$$H_t = f(Q^2) \rightarrow H_t = H_{geo} + \sum J_i L_i + \sum K_i \frac{U^2}{2g} \quad (2.9)$$

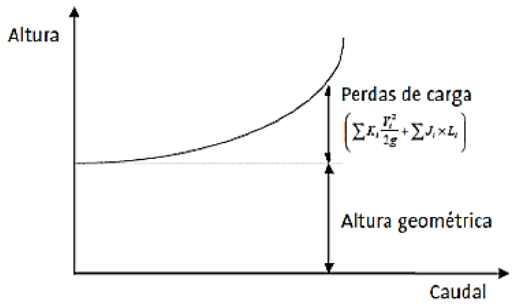


Figura 2.10 Curva característica do sistema adaptado de (Grundfos 2019)

A instalação de uma tubagem de bomba requer atenção a um conjunto de considerações mecânicas, pois entre os efeitos prejudiciais mais comuns que o sistema pode sofrer estão, por um lado, as cargas excessivas no bocal da bomba que a tubagem pode colocar e, por outro, a excessiva carga que válvulas ou bombas verticais em linha podem colocar na tubagem. Para a vida e para a fiabilidade dos equipamentos, é absolutamente essencial assegurar uma análise e uma conceção adequadas da tubagem e da disposição da bomba, antes da instalação de um sistema. Esses cuidados ajudam a garantir que as cargas permanecem abaixo dos limites aceitáveis para as bombas instaladas.

2.2.4 Válvulas e equipamentos acessórios

A função das válvulas consiste no controlo de caudal (válvulas de regulação ou controlo) ou de isolamento do escoamento (válvulas de seccionamento). Numa instalação elevatória podem utilizar-se vários tipos válvulas: de gaveta; de globo e angular; cônicas; de borboleta; de esfera; de retenção (Guyer, 2012). Quando o caudal de uma bomba é regulado através de uma válvula a curva do sistema é alterada. Se o caudal for diminuído, o ponto de funcionamento, na curva da bomba, move-se para a esquerda. O fechamento de válvulas é uma forma de controlar os caudais, por estrangulamento direto ou numa linha de *bypass*. A válvula de regulação mais utilizada é a de globo. Na Figura 2.11 apresentam-se algumas das possíveis alterações causadas por uma manobra de estrangulamento.

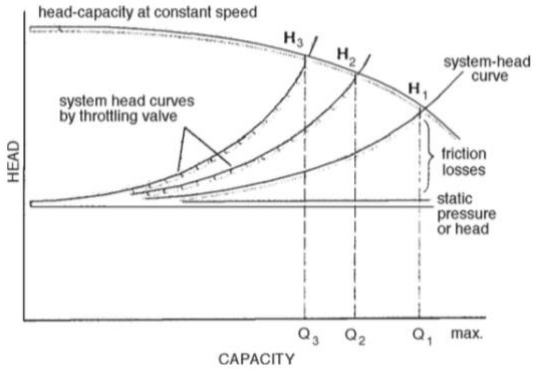


Figura 2.11 Alterações na curva do sistema, causado por uma válvula de regulação (Hydraulic Institute, 2017)

2.3 Dimensionamento de instalações elevatórias e práticas para instalação

2.3.1 Dimensionamento de instalações elevatórias

Para efeitos de dimensionamento de instalações elevatórias, importa considerar três elementos centrais: o caudal a elevar; a altura de elevação; o NPSH. A altura de elevação já foi tratada em 2.2.3, e o NPSH, apesar de ter também sido tratado em 2.2.3, será aprofundado nesta secção.

As instalações elevatórias são elementos que devido ao modo como operam e ao seu peso no consumo energético, requerem uma análise aprofundada (Sousa, 2001). A maioria das bombas presentes nos sistemas abrangidos pelo estudo são centrífugas, a informação que se segue refere-se particularmente a este tipo de bombas.

Para o dimensionamento de sistemas de distribuição de água é necessário ter em conta que o sistema deverá assegurar a satisfação de consumos domésticos, comerciais, industriais, de serviços, consumos públicos como privados na hora de maior consumo do horizonte de projeto, garantindo ainda disponibilidade para combate a incêndios (Sousa, 2001).

O primeiro passo para calcular o caudal requerido consistirá na obtenção de uma estimativa da população que irá ser servida pelo sistema, incluindo a previsão da evolução demográfica (Sousa, 2001). De seguida, calculam-se os caudais para assegurar a satisfação dos seguintes consumos: domésticos; comerciais e de serviços; industriais e similares; púbicos; decorrentes de perdas e fugas; para combate a incêndios. No presente estudo, o cálculo do caudal é realizado com base em dados de consumos já disponíveis. Caso não se disponha de informação relativa às diferentes áreas de consumos, os valores devem ser estimados tomando como referência os valores de capitação, definidos pelo Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, aplicados à dimensão e as características do aglomerado.

Para sistemas de águas residuais, o caudal de dimensionamento deve ser calculado tendo em conta, por um lado as necessidades de transporte das águas residuais do caudal máximo instantâneo para o local de tratamento ou de rejeição e, por outro, o arrastamento de sólidos em suspensão, sobretudo quando se escoam caudais de menor dimensão, garantindo a necessidade de promover a sua afluência aos locais de tratamento (Saldanha Matos, 2003). O método para estimar a população nos projetos de águas residuais é semelhante ao utilizado em projetos destinados ao abastecimento de água. Assim como sucedeu para o estudo do abastecimento, o cálculo do caudal para a drenagem é elaborado com base em dados de consumos já disponíveis.

Quando se trata de substituir uma bomba existente, as exigências dimensionamento são menores visto que já se conhece o comportamento do sistema. No entanto, é importante não esquecer que não são só as bombas que sofrem desgaste, as condutas e os dispositivos também o sofrem, donde resultam perdas de carga mais acentuadas e alteração da curva original do sistema. Quando se pretende dimensionar uma bomba para um novo sistema devem respeitar-se os procedimentos mais adequados.

Após conhecidas as características e necessidades exigidas pelo sistema de bombeamento, segue-se a seleção da bomba que será mais adequada (a que apresenta melhor rendimento) para incorporar o sistema. Para selecionar uma bomba é necessário definir a capacidade nominal requerida, que compreende os valores designados por altura de elevação, H, e por caudal, Q, para o rendimento máximo, também conhecido por ótimo. Outra grandeza fundamental para selecionar a dimensão de uma bomba é a velocidade de rotação do motor a que deve operar. Este valor é obtido a partir da relação entre H e Q, H=f(Q), equação denominada por curva característica da bomba (Sousa, 2001). Para conhecer o ponto de funcionamento é necessário: definir a curva do sistema, a qual representa a relação entre o caudal e a energia necessária para elevar a água, vencer perdas de carga nas condutas de aspiração e elevação, e ainda, para manter as pressões desejadas a jusante ou atingir as cotas dos reservatórios (Sousa, 2001). A interseção da curva do sistema com a curva da bomba para o número de rotações do motor em causa, designa-se por ponto de funcionamento e encontra-se ilustrada na Figura 2.12.

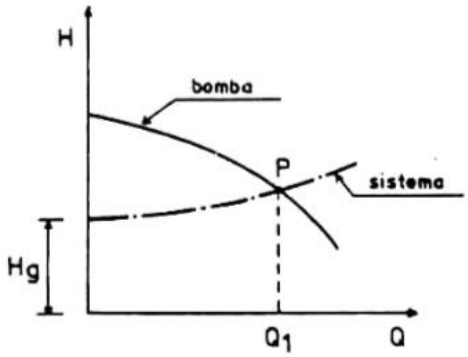


Figura 2.12 Curvas características do sistema e da bomba-ponto de funcionamento da bomba (Sousa, 2001)

A curva característica da bomba Q-H é fornecida pelos fabricantes de bombas. A curva característica da bomba Q-H varia com o diâmetro do impulsor (Figura 2.13), a velocidade de rotação (Figura 2.14) e a forma do impulsor (Figura 2.15).

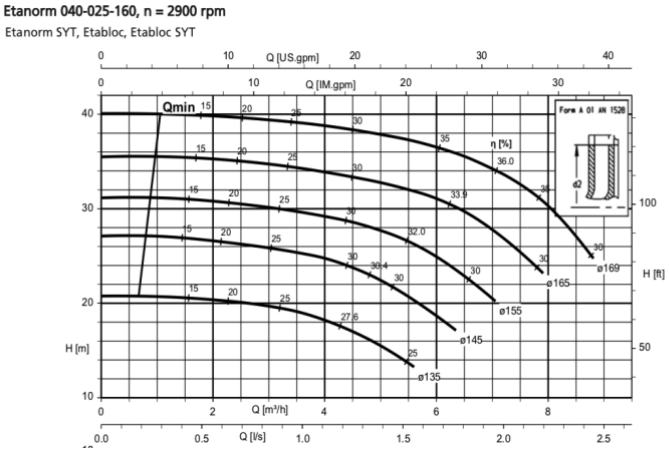


Figura 2.13 Curvas características da Bomba KSB Etanorm, para diferentes diâmetros do impulsor (KSB, 2020)

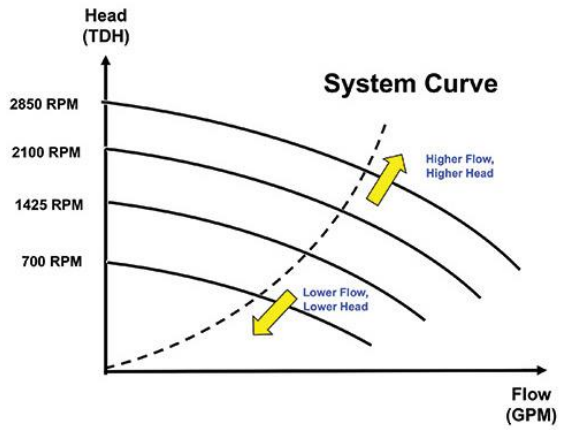


Figura 2.14 Exemplo do efeito da variação da velocidade de rotação numa bomba centrífuga (Gutai, 2015)

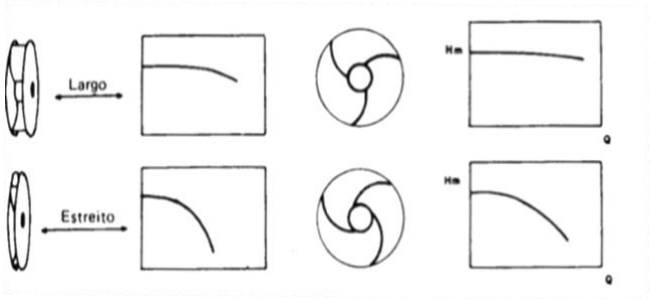


Figura 2.15 Exemplo da influência da forma do impulsor no andamento da curva (Carvalho, 2019)

É necessário ter em conta algumas considerações relativas ao funcionamento das bombas (Quintela, 1981). Para bombas semelhantes e existindo uma curva característica do sistema e dois caudais diferentes, a fim de conseguir operar para cada ponto de serviço é necessário alterar o número de rotações especificas, n_s, da bomba. Caso se pretenda diminuir o caudal bombeado por uma bomba sem se alterar a bomba ou o seu número de rotações, pode introduzir-se uma válvula que irá provocar uma perda de carga singular. Caso seja necessário a alteração do número de rotações do sistema com regularidade, é aconselhada utilização de um variador de velocidade. Assim, podemos garantir que as perdas de rendimento não serão tão acentuadas.

Verifica-se que para curvas de bomba muito inclinadas existe uma reduzida variação para a gama de caudal e uma grande para a altura de elevação, e vice-versa. Quando a curva característica do sistema corta a curva da bomba em dois pontos muito próximos, ou seja, quando se cortam segundo ângulos pequenos, o funcionamento pode ser extremamente instável. Ligeiras variações de pressão podem dar origem a mudanças bruscas no funcionamento.

Para se escolher, estudar e monitorizar o comportamento de uma bomba, em cada circunstância, é fundamental conhecer o local de instalação, bem como os equipamentos que compõem o sistema de bombeamento. Em teoria, o ideal para cada sistema é que a curva característica do sistema trabalhe sempre na curva da bomba, situação que, na prática, nem sempre ocorre. Pode citar-se como exemplo uma sobrepressora que trabalha com volumes alternados e com alturas de elevação variadas também.

Dada a incerteza relativa às condições de funcionamento da bomba, torna-se fundamental um dimensionamento muito rigoroso da instalação elevatória (Quintela, 1981).

Não compete ao comprador, mas ao fabricante elaborar a curva da bomba, que disponibiliza a curvas de cada bomba em forma de catálogo (Figura 2.16).

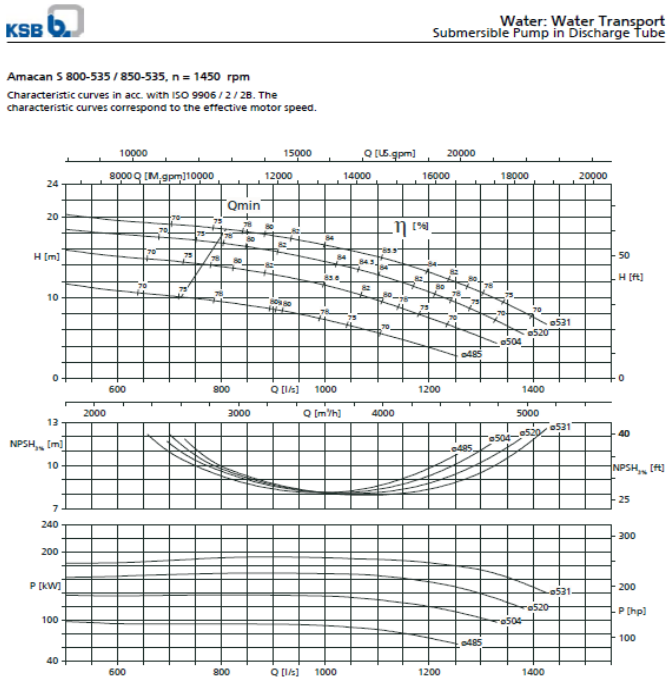


Figura 2.16-Curvas características de uma bomba (KSB, 2020)

Um dos fatores a considerar no dimensionamento das instalações elevatórias é a energia específica mínima que o escoamento pode ter na flange de aspiração da bomba para evitar a cavitação. Respeitar o seu dimensionamento é importante e este aspeto foi referido em 2.2.3. No entanto, é necessário ter presente como é obtido o valor do $NPSH_r$. O valor do NPSH requerido pela bomba, $NPSH_R$, é determinado por via experimental e fornecido pelo fabricante da bomba em função do caudal e da velocidade de rotação. Também é usual recomendar uma margem de segurança (≥ 0,5 m) a adicionar ao $NPSH_R$, que varia consoante o tipo de bomba e seus materiais.

Apresenta-se, de seguida, as principais etapas para a elaboração de um projeto de um sistema elevatório (Carvalho, 2019):

1. Determinar o diâmetro das condutas de aspiração e de elevação.
2. Determinar a perda de carga nas condutas de aspiração e de elevação.
3. Calcular a altura de elevação.
4. Escolher o tipo, a dimensão e o número de bombas a instalar em função do caudal, da altura de elevação, do líquido a ser elevado e das condições operacionais.
5. Especificar a bomba através de curvas fornecidas por fabricantes.
6. Verificar se a altura de aspiração é suficiente para que não ocorra cavitação.

O dimensionamento de uma bomba de águas residuais é idêntico ao de uma bomba de abastecimento de água. Tratando-se de águas não limpas, existem outros fatores a considerar, sendo que o que requer mais atenção são os sólidos presentes no líquido bombeado que podem levar a problemas de acumulações de materiais fibrosos que podem entupir o impulsor em estações elevatórias e estações de tratamento de águas residuais. Assim, é essencial escolher bombas específica para águas residuais (Strand, 2020).

2.3.2 Associação de bombas numa instalação elevatória

Em situações em que a altura de elevação ou o caudal necessário são superiores a capacidade de elevação da bomba, recorre-se à instalação de bombas em série ou em paralelo. A instalação de bombas em série permite operar para alturas de elevação mais elevadas, enquanto uma disposição em paralelo permite operar para uma maior gama de caudais. Numa instalação elevatória deve existir sempre uma bomba de reserva (Carvalho, 2019).

A instalação de bombas em série permite aumentar a altura de elevação, sendo a altura de elevação total igual à soma das alturas de elevação de cada uma das bombas, e o ponto de funcionamento do sistema obtém-se pela interceção da curva característica equivalente ao conjunto das duas bombas em série com a curva do sistema (Figura 2.17)

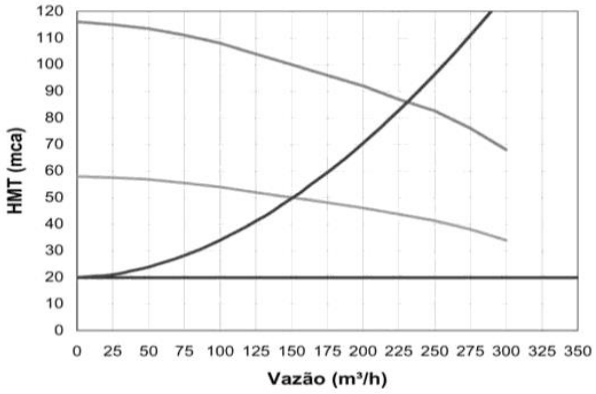


Figura 2.17 Associação de bombas iguais em série (Monachesi, 2005).

Quando as exigências de caudal são muito elevadas ou quando o caudal for muito variável é recomendado instalar bombas em paralelo. A instalação de bombas em paralelo apresenta como vantagem adicional, a segurança operacional, pois em caso de falha de uma bomba, o resultado será apenas uma diminuição no caudal fornecido e não a interrupção da IE. Acresce que a instalação em paralelo confere flexibilidade operacional, pois o funcionamento de uma ou mais bombas permite operar com uma eficiência mais favorável, o que não acontece com uma só bomba, que para fornecer caudais variáveis teria que funcionar com rendimentos desfavoráveis (Carvalho, 2019).

É também útil analisar o que acontece nos vários casos em que se colocam bombas em paralelo: bombas iguais com curvas estáveis; bombas iguais com curvas instáveis; bombas diferentes.

No caso de bombas iguais com curvas estáveis verifica-se que, comparando com a situação em que a bomba opera sozinha, o caudal aumenta, pois cada bomba eleva metade do Q_{total}, como consequência, o NPSH disponível será menor e o requerido maior, sendo a cavitação desfavorável. Esta situação deve ser considerada no dimensionamento (Carvalho, 2019). A curva característica equivalente a bombas instaladas em paralelo pode determinar-se somando os caudais para cada altura de elevação (Figura 2.18).

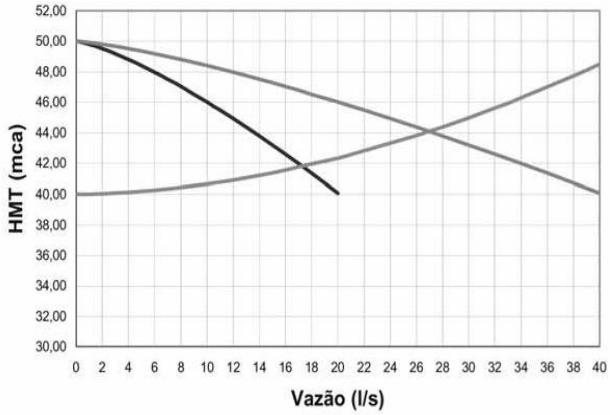


Figura 2.18 Instalação de bombas iguais em paralelo (Monachesi, 2005).

No caso de bombas iguais com curvas instáveis, curvas que para a mesma altura de elevação podem corresponder dois caudais diferentes, além das considerações enunciadas no caso anterior, é necessário considerar que as bombas devem operar com alturas totais de elevação inferiores à correspondente ao ponto de funcionamento em vazio, para evitar operação instável.

No terceiro caso (Figura 2.19) que consiste em bombas diferentes instaladas em paralelo, para além das considerações relativas à cavitação referidas no primeiro caso, o ponto de operação não pode ter uma altura de elevação maior do que a operada por uma das bombas, pois isso implicaria caudal em sentido contrário e o fechamento da válvula de retenção, com uma consequente operação em vazio (Carvalho, 2019).

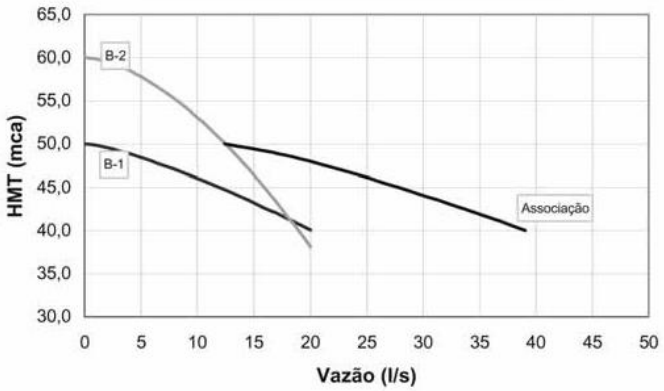


Figura 2.19 Instalação de duas bombas em paralelo diferentes, com curvas estáveis (Monachesi, 2005).

2.3.3 Práticas recomendáveis na instalação de sistemas de elevação

A secção que se segue apresenta algumas das práticas recomendáveis para garantir que o funcionamento de todo o sistema hidráulico não compromete negativamente o rendimento final.

Os resultados da investigação permitem identificar e recomendar um conjunto de práticas que evitam problemas e se traduzem em maior eficiência do sistema (Chaurette, 2011): escolha das dimensões mais adequadas para o diâmetro das condutas; cálculo da altura de elevação e da pressão necessária nos pontos altos do sistema; especificação da altura de elevação nominal das bombas; garantia da altura de aspiração; proteção contra o golpe de ariete; tipos de arranque; condições para assegurar o escorvamento.

A escolha do diâmetro das condutas que ligam à bomba depende da ponderação do custo de instalação versus vantagens de se evitar a perda de carga associada, dado que uma conduta com diâmetro maior, sendo mais cara, provoca menores perdas de carga e vice-versa em relação à de menor diâmetro. (Heinz e Budris, 2015).

De acordo com indicado no Artigo n.º 175 do Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto, as condutas elevatórias em águas residuais devem respeitar parâmetros específicos, enumeram-se alguns dos principais: o diâmetro interior das condutas elevatórias deve ser definido em função de estudo técnico-económico que abranja todo o período de exploração, sendo recomendável que o seu valor não desça abaixo de 100 mm; a velocidade mínima de escoamento deve ser de 0,70 m/s; o perfil longitudinal deve ser preferencialmente ascendente, não devendo a linha piezométrica intersectar a conduta, mesmo em situações de caudal nulo; devem ser definidas as envolventes de pressões mínimas e máximas provenientes da ocorrência de regimes transitórios e verificada a necessidade ou não de órgãos de proteção; sempre que se pretenda libertar o ar das condutas deve recorrer-se preferencialmente a tubos de ventilação; deve ser evitada, sempre que possível, a colocação de ventosas nas condutas elevatórias, mas, em caso de absoluta necessidade, devem ser utilizadas ventosas apropriadas para águas residuais

No dimensionamento da altura manométrica da bomba convém considerar as pressões mínimas necessárias nos pontos altos do sistema. Se se tratar de uma rede de distribuição, não garantir a pressão mínima pode comprometer o abastecimento nesses pontos de consumo. Se se tratar de um sistema adutor, se a pressão for inferior à atmosférica pode conduzir à contaminação da água caso existam fugas e ocorra a entrada de líquidos do exterior ou induzir a vaporização do fluido e a criação bolsas de vapor que introduz uma perda de carga adicional no sistema (Chaurette, 2011).

Embora em qualquer instalação a qualidade e adequação dos equipamentos sejam aspetos muito relevantes, é necessário ter em conta a forma como a bomba é instalada. Um dimensionamento errado ou uma instalação deficiente resultam no mau desempenho do sistema elevatório. Um aspeto crucial a atender na montagem da bomba é minimizar a vibração dinâmica do sistema mecânico, sendo indispensável uma execução das fundações que evite colocar a tubagem em esforço, e um alinhamento

do eixo bomba-motor que resulte numa colocação adequada. No mercado estão disponíveis vários tipos de placas para instalar na base da bomba: em ferro fundido; em aço revestido; em "aço fabricado com características melhoradas"; em betão polímero moldado, entre outros. O bloco das fundações deve ser construído em betão, de acordo com o desenho da instalação do grupo. Uma vez o betão consolidado e antes de instalar os equipamentos é importante verificar se a superfície ficou totalmente plana. Fundações mal realizadas constituem uma deficiência difícil de detetar e são extremamente difíceis e caras de resolver à posteriori (Heinz e Budris, 2015).

Mesmo quando a altura de aspiração é respeitada, é aconselhado respeitar uma distância mínima entre a superfície livre do reservatório de montante e o eixo da conduta de aspiração no ponto de ligação com o reservatório, designada por submergência mínima. Normalmente, a submergência mínima deve ser de 1,5-2 vezes o diâmetro da conduta de ligação. Se esta submergência mínima não for garantida, formar-se-á um vórtice na superfície da água que provocará a entrada de ar na bomba e criará problemas de funcionamento (Chaurette, 2011).

Evitar que a bomba funcione em direção inversa é igualmente importante, pois o motor pode ser danificado. Para evitar a inversão do escoamento é comum a instalação de uma válvula de retenção imediatamente a jusante da flange de compressão da bomba (Heinz e Budris, 2015).

Para a instalações de bombas em série, é importante certificar se a altura de elevação nominal das bombas é a adequada. Este aspeto é particularmente crítico no caso em que o sistema possa ficar bloqueado devido a uma obstrução. Todas as bombas atingirão o seu ponto de funcionamento em vazio e a pressão produzida será cumulativa. O mesmo se aplica à pressão nominal das tubagens e flanges (Carvalho, 2019).

O golpe de ariete consiste na variação de pressão causada por uma alteração do caudal, que pode provocar o rebentamento das tubagens, a rotura de uniões de cabos e danificar a bomba (Grundfos, s/d). Algumas das soluções que visam a proteção das condutas elevatórias contra o golpe de ariete, são: a utilização de chaminés de equilíbrio ou reservatórios hidropneumáticos a jusante da instalação elevatória, cujo efeito é reduzir o comprimento interessado no fenómeno do golpe de ariete; reservatórios unidirecionais que alimentam as condutas quando as cotas piezométricas atingem no valores inferiores aos níveis de água nesses reservatórios; condutas de curto circuito (ou de *by-pass*) ligadas ao reservatório de alimentação da bomba e munidas de válvulas de retenção, que alimentam a conduta elevatória quando a cota piezométrica atinja valores inferiores ao nível do reservatório de alimentação; válvulas de descarga automática que abrem ao iniciar-se o aumento da pressão, deixando escoar água para a atmosfera, impedindo a continuação do aumento e fechando depois lentamente; válvulas de entrada de ar, permitem a saída controlada do ar, para evitar sobrepressões elevadas (Quintela, 1981).

Algumas das boas práticas identificadas pelos especialistas referem-se ao tipo de arranque da bomba, que pode ocorrer: contra uma válvula de regulação fechada em que a pressão a jusante da bomba vai crescendo à medida que aumenta a velocidade de rotação. Uma vez atingida a velocidade de rotação

de regime, deve proceder-se à abertura da válvula para que o funcionamento da bomba tenda para o ponto do regime permanente: interseção da curva da bomba com a de instalação; contra uma válvula de retenção, em que esta se mantém fechada até que a velocidade de rotação atinja um valor tal que a correspondente altura de elevação no funcionamento em vazio excede a carga estática sobre a válvula, e a parir deste momento ocorrência da abertura da válvula. (Quintela, 1981).

O escorvamento ou ferragem de uma bomba em situações em que esta esteja instalada acima da superfície livre do reservatório de alimentação pode ser realizado manual ou automaticamente. Para o escorvamento manual utilizam-se válvulas de pé e para o automático usam-se dispositivos capazes de produzir depressão, como por exemplo reservatórios auto-escorvantes, ejetores e bombas de vazio (Quintela, 1981).

Existem outras recomendações para uma correta instalação de uma IE (Chaurette, 2011): sempre que possível, garantir que uma bomba não trabalha em vazio durante longos períodos; a utilização de um pressostato que garante que desliga o sistema quando ocorrem pressões muito elevadas; incorporação de um manómetro, tanto no lado da descarga como no da aspiração, em especial nas sobrepressoras, de modo a facilitar o cálculo da altura de elevação e o diagnóstico de problemas; utilizar uma válvula de retenção na linha da aspiração e uma válvula de gaveta na conduta de aspiração e na de elevação; utilizar sempre um redutor excêntrico na aspiração da bomba quando é necessária uma transição de tamanho da tubagem; se for necessário utilizar válvulas de regulação, colocá-las sempre no lado da descarga da bomba e nunca do lado da aspiração.

Um das maiores causas da ineficiência energia, envolve o sobredimensionamento de uma bomba, que resulta da escolha de margens excessivamente conservadoras na seleção da capacidade de caudal e altura de elevação (Heinz e Budris, 2015).

2.4 Diagnóstico de instalações elevatórias

2.4.1 Fatores que influenciam o desempenho dos grupos eletrobomba

Alguns dos fatores que influenciam negativamente o desempenho dos grupos elevatórios estão relacionados com a sua operação longe do seu ponto ótimo de funcionamento, designado por *Best Efficiency Point* (BEP), o que provoca fenómenos de cavitação, vibração excessiva, recirculação do fluido, desgaste do equipamento, redução da eficiência e redução da vida útil (Jennings, 2013).

A bomba também pode degradar-se rapidamente devido a outros aspetos, como sejam: impulsor de tamanho incorreto; velocidade de rotação incorreta; NPSH disponível na instalação insuficiente; submergência insuficiente; bloqueio parcial da linha de aspiração; operação da bomba na direção errada (Elsey, 2019).

O fenómeno de cavitação ocorre em especial para caudais muito elevados, quando o caudal aumenta para além do BEP, fazendo aumentar a altura de aspiração positiva líquida necessária ($NPSH_R$) e excedendo a altura de aspiração positiva líquida disponível ($NPSH_D$). Os efeitos negativos são o

desgaste das superfícies do impulsor resultando num tempo médio entre reparações mais reduzido e num tempo de vida útil mais curto.

A vibração excessiva pode resultar num mau funcionamento da bomba. Verifica-se quando a bomba opera para caudais acima do BEP, devido em parte à cavitação, que provoca desequilíbrios hidráulicos dentro do impulsor, com bolsas de vapor formados pela vaporização do líquido. Este tipo de ocorrência pode danificar o impulsor e agrava o risco de falha no eixo.

A recirculação do fluido na entrada ou na saída da bomba pode causar instabilidade significativa, reduzir o caudal ou provocar danos semelhantes aos da cavitação que podem levar a uma falha da bomba. Como resultado da recirculação e cavitação, verifica-se uma redução da vida útil do rolamento e da vedação que aumenta os custos de manutenção, uma vez que estes componentes terão de ser substituídos. A instabilidade do impulsor que ocorre na operação fora de BEP pode levar a falhas no eixo, desgaste prematuro da vedação, falhas no selo mecânico, ou simplesmente temperaturas de rolamento mais elevadas que afetam a lubrificação.

Em caudais reduzidos, muito abaixo do BEP, as forças atuantes sobre o impulsor das bombas centrífugas são radiais e por natureza atuam perpendicularmente ao eixo, estas forças podem resultar numa deflexão excessiva do eixo ou até quebrar e danificar os rolamentos. Outro dos fatores que pode influenciar o desempenho de um sistema elevatório é a abrasão que ocorre para pontos muito afastados à esquerda do BEP, quando o líquido contém sólidos ou outros abrasivos. Nesta circunstância, os líquidos devem fluir continuamente através da bomba a um volume relativamente elevado. Se o caudal se aproximar do funcionamento em vazio, a circulação interna destas substâncias pode causar um aumento do desgaste da vedação e erosão da voluta, impulsor, eixo e anéis de desgaste. Algumas bombas com impulsores mais pequenos podem funcionar perto do ponto nulo de caudal, com poucos ou nenhuns danos que possam ser atribuídos a forças radiais. Os danos que podem ocorrer são frequentemente devidos à temperatura elevada. Em bombas que funcionam na altura de elevação máxima durante períodos prolongados, se não for instalado um bypass, a água pode até vaporizar e, se o fizer, o selo mecânico pode perder a sua fonte de lubrificação e falhar. O aumento da temperatura pode também ter um efeito sobre a corrosividade de certos líquidos (incluindo a água), o que pode resultar num aumento da erosão (Evans, 2011).

Outros fatores apontados incidem nos desajustes entre o fluxo e as palhetas de revestimento causados pelos caudais mais altos e mais baixos. Este desajuste pode causar turbulência no interior do impulsor e nas passagens de caudal no interior da carcaça, o que bloqueia a as passagens de fluxo e aumenta as velocidades locais. O aumento de velocidade aumenta a cavitação e quanto maior for a cavitação e turbulência, menor será a eficiência e fiabilidade da bomba e maior será o ruido, vibração e erosão. Para bombas com elevada energia de sucção e rácios de $NPSH_A/NPSH_R$ abaixo dos 3, especialmente quando operadas na faixa de recirculação de sucção, podem surgir danos por ruído vibração e erosão por cavitação. O fenómeno da cavitação pode ser especialmente crítico para materiais como o ferro fundido (Budris, 2016).

É expectável que o desempenho das bombas decresça com a utilização, desgaste dos seus componentes, cavitação e erosão. Contudo, se não houver manutenção adequada, é nos dois primeiros anos de vida que essa diminuição do desempenho é mais acentuada, podendo haver uma perda de rendimento de 5 % a 15 %, resultante em parte da degradação do impulsor e dos anéis de selagem das bombas. Esta redução de rendimento é tanto maior quanto mais o funcionamento da bomba se afastar do seu ponto de funcionamento ótimo. Como anteriormente se apontou, a perda de eficiência resulta em elevados custos de operação para o setor, dado o peso que estes equipamentos têm no consumo energético global (ERSAR, 2020).

O rendimento esperado da bomba é muito dependente da velocidade específica, bem como do tamanho e tipo da bomba, e aumenta à medida que estas duas variáveis aumentam. Na Figura 2.20 que se segue podemos verificar que para caudais, velocidades de rotação e consequentemente potências maiores, se observam rendimentos superiores.

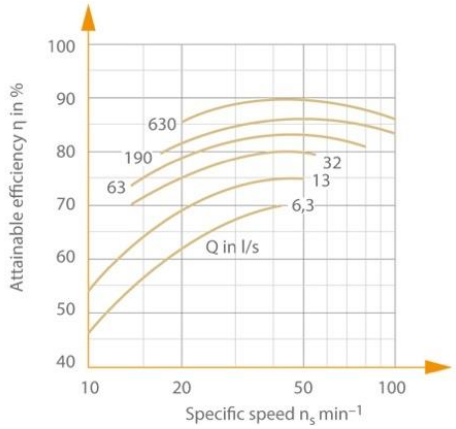


Figura 2.20 Eficiências η de bombas de alta pressão multiestágio em função da velocidade específica n_s (KSB, 2020)

2.4.2 Instrumentos para diagnóstico

Existem duas abordagens que podem ser seguidas para o diagnóstico: a realização do balanço energético simplificado ou a realização de auditorias energéticas. O modelo do balanço energético simplificado, permite efetuar uma estimativa da eficiência global de estações elevatórias, com base nas seguintes variáveis anuais: a altura de elevação H_t; o volume anual bombeado, V_a; o consumo energético anual da estação elevatória, E_a , proveniente da fatura energética. Este balanço aplica-se ao nível da estação elevatória e não da bomba individual. Recomenda-se que este balanço seja efetuado para todas as estações elevatórias da entidade gestora, uma vez que permite ter uma primeira estimativa das eficiências globais de cada uma e estabelecer prioridades de atuação. Uma auditoria energética tem como objetivo realizar um estudo no local, que permita identificar em pormenor os dados referentes ao consumo e ao funcionamento dos equipamentos para permitir fazer um diagnóstico de eventuais problemas que possam estar a ocorrer e efetuar recomendações de melhoria. O guia 24 da ERSAR apresenta uma proposta de auditoria energética que deve ser praticada pelas entidades gestoras de água, em que se destacam os seguintes processos: quantificação dos consumos

energéticos e a sua importância na fatura final; inspeção visual dos equipamentos complementada pelas medições necessárias; levantamento e caracterização detalhada dos principais equipamentos consumidores de energia, sobretudo com maior peso em termos de potência instalada; verificar a existência do bom funcionamento dos aparelhos de controlo e regulação do equipamento de conversão e utilização de energia, determinar consumos específicos de energia durante o período de realização da auditoria, para posterior comparação com os valores médios mensais e anuais e deteção de eventuais variações sazonais; identificar e quantificar as possíveis áreas onde as economias de energia são viáveis, como resultado das situações encontradas/anomalias detetadas e medições efetuadas; definir intervenções com viabilidade técnico-económica, conducentes ao aumento da eficiência energética e/ou à redução da fatura energética; Identificar o período de retorno do investimento das medidas de eficiência energética (Santos et al., 2018).

Uma auditoria energética a uma bomba é um teste experimental onde são monitorizados o caudal, as pressões a montante e jusante do grupo e as potências ativa e reativa para as várias condições de operação da bomba. Para uma bomba com uma pequena gama de caudais de funcionamento, este ensaio pode ser feito estudando os dados associados a um caudal que represente o funcionamento normal da bomba. Em sistemas mais complexos, em que a bomba pode funcionar numa dada gama de caudais e de alturas manométricas, a auditoria energética de uma bomba pode exigir vários ensaios individuais que abranjam a gama de requisitos de desempenho da bomba, ou pode exigir uma monitorização contínua ao longo um período de tempo para captar os extremos operacionais.

No processo de seleção e de monitorização de um equipamento eletrobomba é fundamental efetuar o dimensionamento de modo a que opere perto das suas condições nominais de funcionamento. Existem várias recomendações sobre a gama de valores de caudal em que deve operar uma bomba (Chaurette, (2011); Budris, (2016); ANSI/HI 9.6.3-2012), podendo esta variar entre 70-80% e 110-120% do caudal nominal. A operação fora desta gama pode trazer vários problemas de funcionamento já referidos, como sejam, o excesso de vibração ou a cavitação que irão acelerar a degradação, reduzir a vida útil e exigir manutenção mais intensiva da bomba. Segundo Ferman (2015), para os equipamento de dimensões semelhantes aos que serão analisados na presente dissertação, uma bomba não deve operar continuamente abaixo de 50% do caudal nominal.

Na Figura 2.21 apresenta-se o tipo de funcionamento esperado em função da curva e quais as consequências caso o ponto de funcionamento opere para zonas fora das gamas recomendadas.

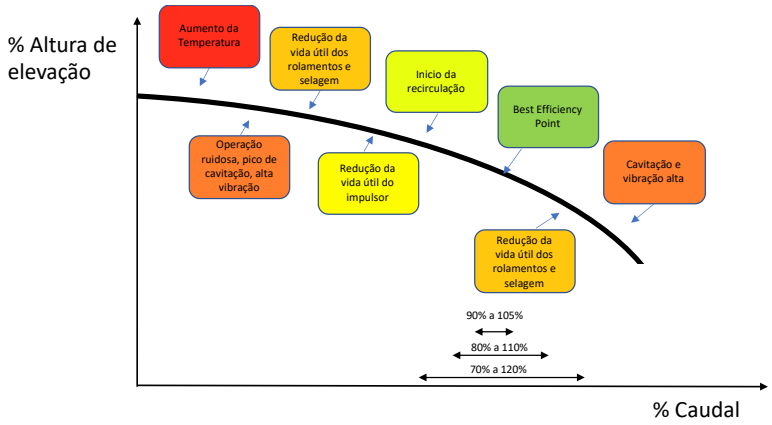


Figura 2.21 Pontos de funcionamento ao longo da curva Q-H (Ferman, 2015)

Para avaliar a eficiência é necessário determinar o ponto de funcionamento ótimo da bomba, de modo a definir as margens de operação designadas por região de operação recomendada (ROR) e região de operação permitida (ROP). É especialmente importante determinar estas regiões de caudal porque nem todas as aplicações da bomba são de natureza estática ou correspondem de perto à procura esperada do sistema. Por este motivo, as bombas são frequentemente obrigadas a funcionar numa vasta gama de caudais, o que pode afetar negativamente a eficiência e fiabilidade da bomba.

No Quadro 2.4 são definidos: o ponto de máxima eficiência e as regiões de operação de acordo com (Budris, 2016).

Quadro 2.4 Definição das regiões de operação

Ponto de eficiência ótima ou *best efficiency point* (BEP)
O desempenho e a vida útil da bomba são otimizados em torno do ponto de eficiência ótima, visto que a eficiência hidráulica é máxima. O funcionamento da bomba é caracterizado por apresentar um escoamento uniforme, livre de separação e bem controlado.
Região de operação recomendada (ROR)
O caudal da bomba permanece bem controlado dentro de uma gama de caudais em torno do BEP, a vida útil não será significativamente afetada pelas cargas hidráulicas, vibrações ou separação do fluxo. Para a maioria das bombas centrífugas situa-se entre 70% e 120% do BEP, exceto para bombas de alta velocidade específica e alta sucção que podem ter regiões de caudal preferenciais ainda mais pequenas em torno do BEP nomeadamente entre 80% a 115%. A fiabilidade da bomba atinge picos de cerca de 90% da eficiência, para razões de caudal entre 90% e 105% do BEP.
Região de operação permitida(ROP)
Corresponde à gama de caudais em que a vida útil de uma bomba não é seriamente comprometida e é normalmente especificada pelo fabricante da bomba. A vida útil dentro da região será inferior à dentro região de operação recomendada.

Uma vez conhecidas estas regiões de caudal e as condições reais do sistema, é fundamental garantir que os equipamentos operam maioritariamente dentro da ROR e tentar minimizar ou evitar que trabalhem fora da ROP de modo a prolongar o ciclo de vida da bomba.

De forma a garantir padrões de segurança e de fiabilidade nos resultados alcançados nas auditorias, são definidas tolerâncias de erro. Segundo a diretiva ISO 9906: 2012, são definidos seis graus de aceitação de testes de desempenho de bombas; 1B, 1 E, 1U, 2B, 2U e 3B. O teste que mais se adequa para bombas de abastecimento de água ou residuais com potência instalada entre 10 e 100 kW é o teste 2B, cujos níveis de tolerância se apresentam no Quadro 2.5. Para potências instaladas inferiores a 10 kW, deve-se adotar a tolerância de ±10 % para caudal e de ±8 % para altura de elevação.

Quadro 2.5 Tolerância de erro correspondente ao grau de aceitação 2B

Variáveis	Tolerância do erro
Caudal	±8 %
Altura de Elevação	±5 %
Potência	+8 %
Rendimento	−5 %

2.5 Medidas para melhoria de eficiência de instalações elevatórias.

No estudo realizado pela NORAQUA Leite et al., (2018), verifica-se que algumas das razões mais relevantes para a perda de eficiência são: (i) diferenças entre o funcionamento real dos sistemas, aquando da instalação, e o previsto em projeto, tomando por base a informação fornecida pelo fabricante (funcionamento em condições ideais), e (ii) deterioração espectável do desempenho do equipamento, ao longo do tempo, contribuindo para o aumento dos consumos de energia associados. Nem sempre a eficiência dos equipamentos instalados corresponde exatamente ao catalogado pelos fabricantes, uma vez que o ponto de operação pode estar afastado do ponto de máxima eficiência ou porque o desempenho dos grupos se degrada ao longo do tempo. No primeiro caso, algumas das razões associadas a este afastamento são: margens de tolerância excessivas quer na curva da bomba quer na curva do sistema; as curvas apresentadas nos catálogos consideram condições ideais de ensaio em laboratório; as variações de alturas de elevação devido à variação dos níveis de pressão a montante e jusante. Na Figura 2.22 apresenta-se uma curva de uma bomba para a situação de operação teórica e real. Verifica-se que os valores medidos numa auditoria *in situ* e os valores fornecidos pelos fabricantes obtidos em condições ideais são diferentes, sendo por isso apresentadas margens de tolerância relativamente ao caudal.

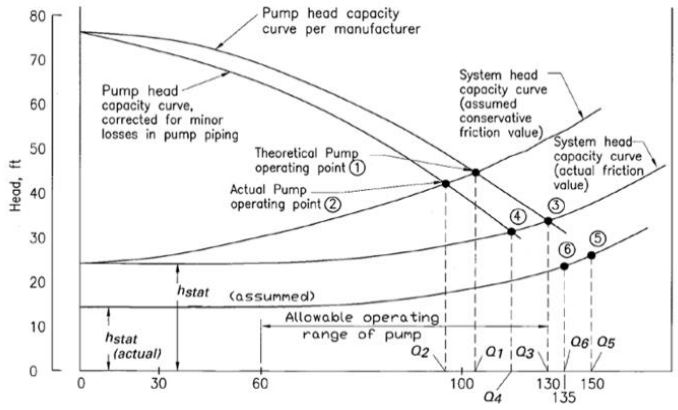


Figura 2.22 Variação do ponto de funcionamento de uma bomba (Bosserman, 2004).

Relativamente à redução de eficiência significativa ao longo do tempo, uma bomba pode perder até 15% da sua eficiência inicial durante a sua vida útil, sendo a redução de eficiência média anual mais acentuada nos primeiros anos de vida, tendendo no entanto a reduzir-se com o aumento do desgaste (Leite et al., 2018).

A manutenção preventiva tem como objetivo corrigir os defeitos antes que se manifestem ou causem danos maiores, mantendo a eficiência média e permitindo poupanças energéticas significativas. Na Figura 2.23 apresenta-se a variação da eficiência de um grupo eletrobomba quando sujeito a manutenção preventiva (*maintained*) ou sem qualquer manutenção (*unmaintained*).

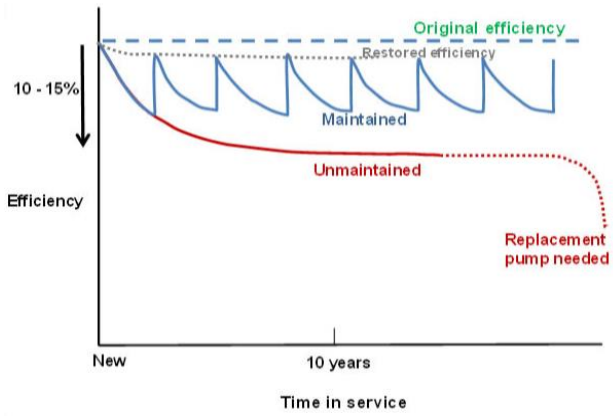


Figura 2.23 Evolução da eficiência de um grupo eletrobomba com e sem manutenção regular (EC, 2001).

No Guia Técnico n.º 24 da ERSAR são apresentadas algumas das medidas mais frequentemente aplicadas na prática da manutenção de bombas, das quais se realçam: instalação de variadores de velocidade para melhorar e adequar o funcionamento do motor às variações do consumo; substituição de motores convencionais por motores de classe mais eficiente; identificar os sistemas de bombeamento que estão a operar fora do ponto de funcionamento ótimo e corrigi-los; subsituir ou modificar bombas sobredimensionadas; aplicar revestimentos nas bombas, particularmente nas volutas, para redução das perdas por atrito; instalar um sistema de gestão de energia que permita monitorizar o funcionamento do sistema de bombeamento; verificar a correta lubrificação e desgaste

dos rolamentos; verificar se o impulsor não apresenta desgaste ou danos; verificar as condições dos vedantes; verificar fugas de ar durante o funcionamento (Santos et al., 2018).

2.6 Lacunas de conhecimento

A informação fornecida abrange um breve enquadramento histórico da evolução dos sistemas de bombeamento até à atualidade. Dá especial foco a temas relevantes para a compreensão das questões de desempenho de instalações elevatórias, nomeadamente a caracterização dos equipamentos constituintes, boas práticas para o seu dimensionamento, análise de fatores que influenciam o seu desempenho, instrumentos de diagnóstico e medidas para melhoria de eficiência das instalações elevatória. De alguma forma, procura enquadrar científica e tecnicamente o estudo descrito neste trabalho. Com o levantamento efetuado neste capítulo foi possível identificar as principais lacunas de conhecimento para as quais o estudo que se segue dá resposta.

- Inexistência de uma metodologia de rápida resposta, que permita diagnosticar e avaliar o desempenho de instalações elevatórias presentes num sistema de abastecimento de água ou águas residuais e proposta de medidas de melhoria para cada instalação elevatória.
- Inexistência de indicadores de desempenho sensíveis e rigorosos associados à eficiência energética das instalações elevatórias baseados em valores de referência comprovados.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Estrutura da metodologia

No presente capítulo, propõe-se uma metodologia para a realização da avaliação da eficiência energética e o estabelecimento de intervenções de melhoria em instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água e de sistemas de drenagem de águas residuais. A metodologia inclui também o estabelecimento de prioridades de intervenção, o estudo de propostas de melhoria e a recomendação final para implementação. Estrutura-se de acordo com as seguintes etapas:

Etapa 1. Identificação e cálculo dos indicadores de desempenho.
Etapa 2. Recolha e processamento de dados orientada pelos indicadores.
Etapa 3. Diagnóstico e identificação das instalações elevatórias prioritárias.
Etapa 4. Estabelecimento e identificação de medidas de melhoria da eficiência.
Etapa 5. Análise económica.

3.2 Etapa 1: Identificação e cálculo de indicadores de desempenho

Esta etapa tem como objetivo identificar um conjunto de indicadores que permitam avaliar o desempenho de instalações elevatórias que vão ser apresentadas nos casos de estudo. Os indicadores estão organizados em três categorias: 1) indicador principal que permite avaliar a qualidade com que as instalações elevatórias satisfazem as exigências do sistema; 2) indicadores complementares, ou indicadores complementares da eficiência, que permitem fundamentar os resultados obtidos pelo indicador principal; e 3) indicadores associados ao consumo energético e ao custo. Os indicadores desenvolvidos apresentam-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Identificação de indicadores desenvolvidos para apoio à análise

Indicador de desempenho (ID)	**Definição**	**Fórmula**	**Valores de referência Insatisfatório; mediano; bom**
Indicador principal			
Eficiência global, η_g,*(%)*	Rendimento global ou eficiência é um indicador de eficiência energética, permite avaliar a qualidade com que as IE satisfazem as exigências do sistema. Sendo E_u a energia útil e E_c a energia consumida.	$\eta_g = \frac{E_u}{E_c} \times 100$ (3.1)	Qualidade de serviço: • Insatisfatório:]0%;50%](AA) e]0%;40%](AR); • Mediano:]50%;68%[(AA) e]40%;60%[(AR); • Boa: [68%;100%](AA) e [60%;100%](AR) *

Quadro 3.1 Identificação de indicadores desenvolvidos para apoio à análise (*continuação*)

Indicador de desempenho (ID)	**Definição**	**Fórmula**	**Valores de referência Insatisfatório; mediano; bom**
Indicadores complementares			
Rácio entre o caudal estimado e o caudal nominal, $Q/Q_n(\%)$	É um indicador de desempenho que se expressa pela relação entre o caudal nominal da bomba (Q_n) e o caudal real (Q). Permite-nos encontrar várias explicações para eventuais quedas de rendimento ou ocorrência de degradação apenas com valores de caudal estimado e nominal.	$\frac{Q}{Q_n}(\%)$ (3.2)	• Muito Insatisfatório -: [0%; 50%]; • Insatisfatório-:]50%;70%]; • Muito Insatisfatório+) [120%;+∞[; • Mediano:]70%;90%[&]105%;120%[; • Bom: [90%;105%] *
Variação do rendimento relativamente ao rendimento ótimo, $\eta'_0(\%)$	Indicador de eficiência energética que avalia a perda de rendimento de cada IE em função do seu rendimento ótimo, η_0.	$\eta'_0 = \frac{\eta_0 - \eta_g}{\eta_0} \times 100$ (3.3)	Não são apresentados valores de referência
Vida Residual, VR	É um indicador de degradação, que avalia a idade das IE. Valores entre 0 e 1, sendo a VU a vida útil e I, a idade da IE.	$VR = \frac{VU - I}{VU}$ (3.4)	VU dos equipamentos: 25 anos (AA); 20 anos (AR); • Insatisfatório: [0,0;0,2[• Mediano: [0,2;0,6] • Bom:]0,6;1,0]
Degradação Anual, D_a,(%/ano)	É um indicador de degradação que permite avaliar o grau de degradação do rendimento anual sob a forma de rendimento global (η_g) perdido em comparação com o esperado (η_e), a dividir pela idade da IE.	$D_a = \frac{\eta_e - \eta_g}{\mathrm{I}}$ (3.5)	• Insatisfatório: [1,0:+∞[• Mediano: [0,3;1,0[; • Bom: [0,0;0,3[
Indicadores associados ao consumo energético e ao custo			
Poupança Anual, P_a,(€/ano)	É um indicador económico que permite determinar o potencial de poupança energética anual, comparando o consumo energético anual (CE) da IE com o consumo da IE caso opere no rendimento ótimo, e de seguida multiplicando pelo custo unitário da energia (C_{ue}) (€/kWh).	$P_a = \left(CE - \frac{E_u}{\eta_0}\right) \times C_{ue}$ (3.6)	Não são apresentados valores de referência
Tempo de Funcionamento, t_f,(h/ano)	É um indicador de operação que expressa o peso do custo energético, permite identificar os equipamentos que apresentam maior peso energético na sua fatura final		Custos energéticos relevantes para t_f:]2000; +∞[*
Peso do Custo Energético, P_{ce} (%)	É um indicador económico, que expressa a relação entre custo inicial (C_{ic}) e o custo energético (C_e).	$P_{ce} = \frac{C_e}{C_{ic}} \mathrm{x}100$ (3.7)	Compensa otimizar se P_{ce}>1*

* Valores adotados nesta tese. Para os valores de referência relativos à eficiência global, considerou-se o guia técnico 24 (Santos et al., 2018); para o rácio Q/Qn, consideraram-se os autores: Chaurette (2011), Budris (2016) e o manual do hydraulic institute (ANSI/HI 9.6.3-2012). Para a classificação da vida residual é adotado o guia técnico 16 Alegre e Covas (2010); a classificação da degradação anual é baseada no guia técnico 16 de Alegre e Covas (2010). Peso do custo energético e do tempo de funcionamento tem por base Aleixo (2013).

3.3 Etapa 2: Recolha e processamento de dados orientada pelos indicadores

A Etapa 2 consiste na identificação, recolha e processamento dos dados relevantes para o cálculo dos indicadores. São selecionados os dados relevantes, conforme apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 Informação fornecida pelas entidades gestoras para conjuntos de grupos com características semelhantes e que pertencem à mesma instalação elevatória

Designação das variáveis	Descrição e observações
Nome do subsistema	Definido pela entidade.
Número do subsistema	Definido pela entidade.
Localização no subsistema	Entrada ou de saída.
Tipo de componente a montante e a jusante	Reservatório ou rede de distribuição.
Tipo de EEAR	Tipos i, ii e iii de acordo com o guia técnico 23 ERSAR*
Tipo de captação	Superficial ou subterrânea.
Marca e modelo do equipamento	Não são divulgados os nomes reais. Será utilizada uma designação anónima (M1-M11)
Tipo de Bomba	De eixo horizontal ou vertical.
Volume anual bombeado (m^3/ano)	Fornecido pelas EG; registado através de caudalímetros.
Energia anual consumida (kWh/ano)	Fornecido pelas EG; retirado das facturas de energia elétrica.
Período diário de funcionamento (h)	Número médio de horas diárias que cada grupo funciona, por vezes apenas fornecida soma das horas médias de funcionamento dos grupos. Em algumas entidades este valor pode estar sujeito a margens de erro maiores, visto que são EG com maior suscetibilidade à sazonalidade.
Altura de elevação (m)	Fornecida pela EG
Cotas geométricas e níveis de água(m)	Retirado dos mapas altimétricos e dados de exploração das EG.
Número de grupos	Fornecido pelas EG
Existência de variador de velocidade	Fornecido pelas EG.

*Adotados nesta tese, Guia 24 ERSAR (Santos et al. 2018), Guia 23 ERSAR (Covas et al. 2018). tipo i: compactas ou convencionais sem edifício exterior, 2 grupos (1+1); tipo ii: convencionais com edifício exterior, 2 grupos (1+1); tipo iii: convencionais com edifício exterior, ≥3 grupos (≥2+1)

As variáveis mais relevantes resultantes do processamento dos dados são apresentadas no Quadro 3.3. São ainda referidas as variáveis resultantes obtidas através dos catálogos referentes à marca e modelo de cada grupo das IE.

Quadro 3.3 Variáveis resultantes do processamento de dados

Variáveis resultantes	Considerações	Fórmula
Caudal, Q(m^3/s para AA); (l/s para AR)	Caudal estimado para tempos de funcionamento médios diários, t, constantes. Assume-se sempre que possível que grupos trabalham individualmente. Na eventualidade da soma dos tempos de funcionamento excederem 24h considerar funcionamento em paralelo.	$Q = \frac{\frac{\forall a}{365}}{t}$ (3.8)
Desnível geométrico, H_g (m)	Valores retirados através da leitura de mapas de altimetria.	$H_g = Z_r - Z_{ie}$ (3.9)
Energia útil, E_u (kWh)	Energia fornecida ao escoamento	$E_u = \frac{\gamma \forall H_t}{3600\text{x}1000}$ (3.10)
Potência de escoamento, P_h (kW)	Potência fornecida ao escoamento	$P_h = \frac{\gamma \forall H_t}{365 \times t \times 3600\text{x}1000}$ (3.11)
Perda de carga, ΔH	Perda de carga total entre ponto de saída e de chegada. Não é calculada para as sobrepressoras.	$\Delta H = H_t - H_g$ (3.12)

Quadro 3.3 Variáveis resultantes do processamento de dados *(continuação)*

Variáveis resultantes	Considerações	Fórmula
Energia dissipada, E_d	Energia desperdiçada durante o processo de bombeamento	$E_d = E_c - E_u$ (3.13)
Rendimento global, η_g	Rácio entre a energia útil e a energia fornecida para bombeamento.	$\eta_g = \frac{E_u}{E_c} \times 100$ (3.14)
Variáveis resultantes do catálogo referente à marca e modelo de cada grupo		
Rendimento ótimo,η_0	Nos dados técnico dos catálogos dos equipamentos é possível ler o caudal nominal, (Q_n), a altura de elevação nominal, (H_n), o número de rotações nominal, e assim obter o η.	
Rendimento esperado, η_e (%)	Rendimento lido na curva da bomba do catálogo para o ponto de funcionamento definido, despreza perdas como por exemplo: válvulas de regulação.	
Rendimento do motor, η_m (%)	Retirado do catálogo ou calculado	$\eta_m = \frac{P_1}{P_2} \times 100$ (3.15)
Número específico de rotações, n_s (r.p.m.)	Fornecido pela EG ou retirado do catálogo	
Potência absorvida pelo motor, P_1 (kW)	Retirado do catálogo	
Potencia absorvida pela bomba, P_2 (kW)	Retirado do catálogo	

*Caso a informação processada seja incompleta ou incorreta, será necessário esclarecimento direto com a entidade gestora.

Algumas entidades fornecem dados mais detalhados relativos à informação da operação e das componentes dos grupos elevatórios, assim como resultados de auditorias energéticas realizadas no passado recente. Com base nesta informação os dados analisados tornam-se mais fiáveis.

Na Figura 3.1 é possível encontrar a informação mais relevante retirada a partir de um catálogo referente à marca e modelo de um grupo elevatório.

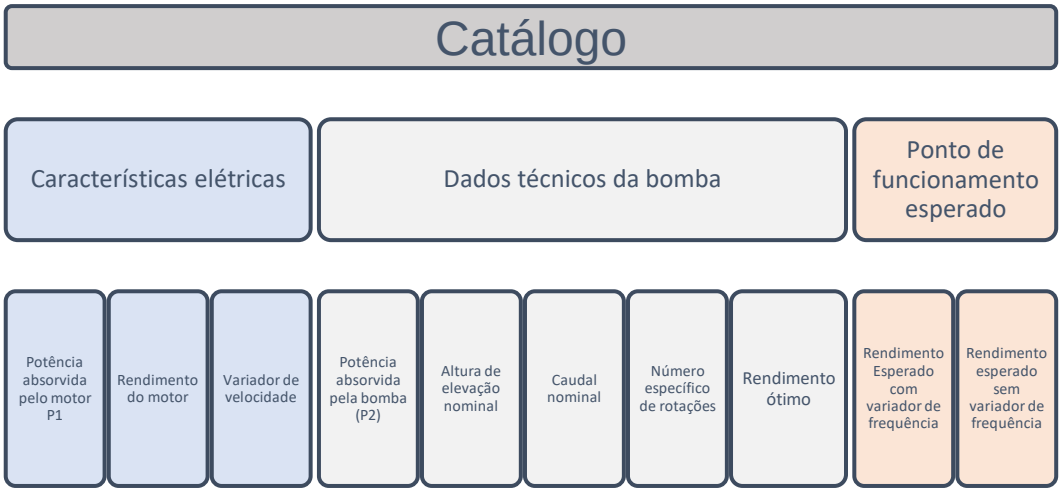


Figura 3.1 Representação esquemática da consulta de um catálogo

Na maioria dos catálogos é apenas apresentada a curva característica caudal-rendimento associada à bomba, não existindo curvas associadas ao motor e ao variador de velocidade. Assim, para a estimativa do valor de rendimento global, que inclui a bomba, o motor e o variador de velocidade (caso exista),

assumiram-se os seguintes pressupostos: o rendimento do motor é 90% para bombas de abastecimento de água, 85% para bombas de águas residuais e 80% para as bombas de captações; caso exista variador de velocidade, assume-se uma perda de 2% de rendimento global.

Durante o processo de recolha da informação relevante para a tomada de decisão, é fundamental, para cada dado ou grupo de dados recolhidos, classificar a respetiva fiabilidade e exatidão, assim verifica-se que:

- Em algumas ocasiões, os fabricantes nem sempre fornecem a curva caudal-rendimento, nesses casos a análise ficou incompleta, visto que o rendimento esperado e o ótimo não são legíveis.
- São adotadas tolerâncias de erro Quadro 2.4 durante a leitura de catálogos e dos pontos de funcionamento correspondentes, caso essas gamas de valores sejam excedidas, a IE não deve ser considerada na análise.

Exemplifica-se, de seguida, a metodologia de consulta de um catálogo de uma bomba multiestágio vertical para abastecimento água.

Na Figura 3.2 exemplifica-se a leitura do catálogo de uma das bomba presentes nos casos de estudo, bomba multiestágio Grundfos, modelo CR 90-2 A-F-A-E-HQQE. São apresentadas as curvas características: (i) caudal-altura de elevação/curva característica da bomba; (ii) curva característica do sistema (H_t^{inst}); as curvas (iii) caudal-rendimento da bomba e (iv) caudal-rendimento da bomba+motor. São também apresentadas as suas (v) especificações, (vi) dados técnicos e (vii) características elétricas (Grundfos, 2020).

São neste exemplo apresentados alguns dos passos mais relevantes para determinação funcionamento esperado para a bomba referida. Inicialmente define-se o ponto de operação, para este exemplo a bomba está dimensionada para o ponto ótimo, caudal nominal muito próximo de 90 m^3/h e uma altura de elevação nominal de aproximadamente 42 m e uma velocidade especifica de 2923 r.p.m.. O motor apresenta uma eficiência aproximada de 90% para este ponto. Por fim verifica-se que o rendimento global (bomba+motor) é aproximadamente 70%.

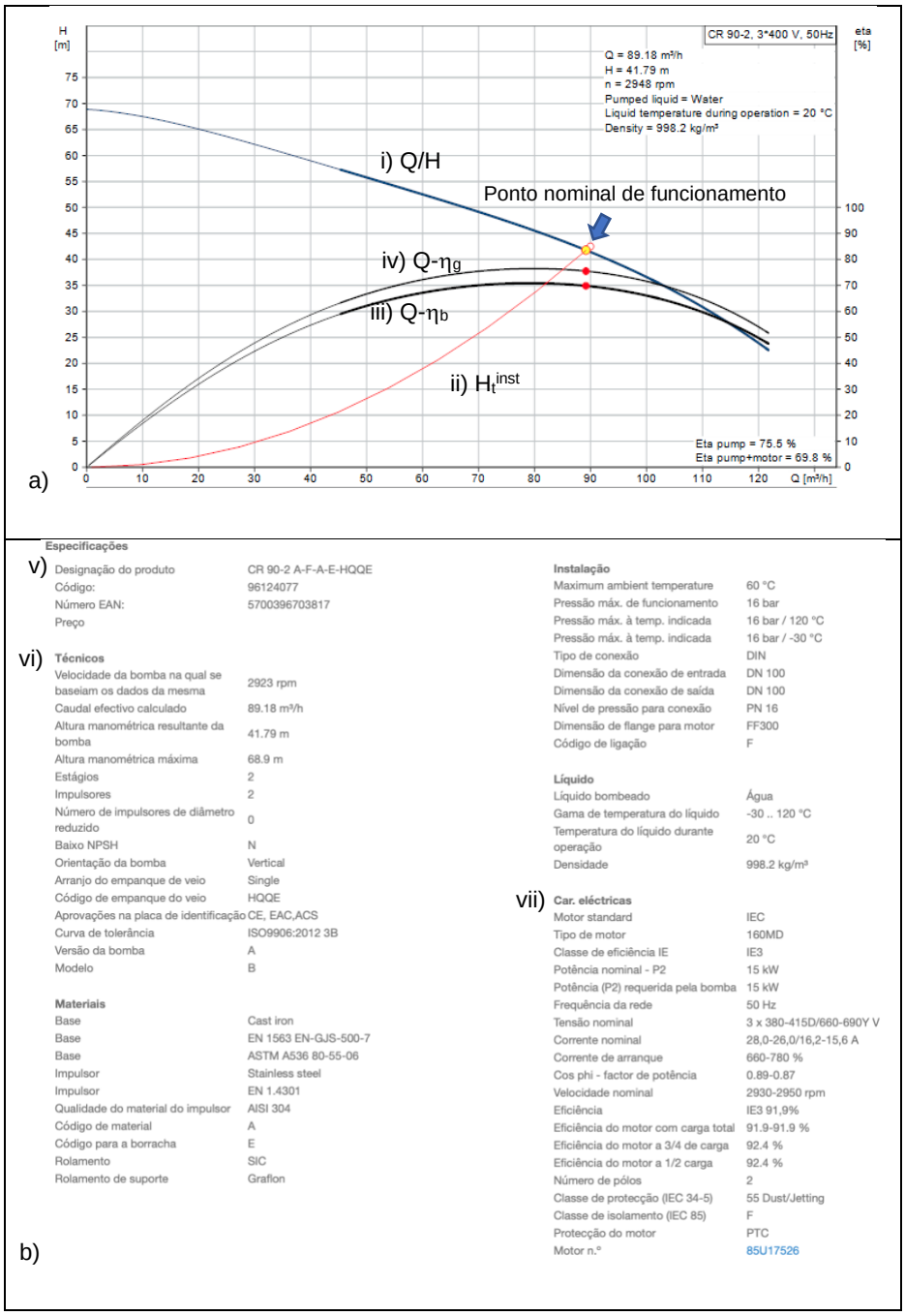


Figura 3.2 a) Exemplo de curvas de características Q-H, Q-η e Q-η_g ; b) Exemplo das especificações de uma bomba apresentadas nos catálogos dos fabricantes (Grundfos, 2020)

Algumas normas nacionais e internacionais relativas à qualidade de construção e de operação das IE apresentadas nos estudos de caso que se seguem, são apresentadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 Normas adotadas na dissertação

Designação da norma	Definição
EN 733	Normas europeia de construção para bombas centrifugas horizontais
IEC 60034-30	Comissão eletrotécnica Internacional(IEC), especifica classes de eficiência energética para motores de indução em gaiola de 2, 4 ou 6 pólos, de velocidade única e contínua(S1), trifásicos
ISO EN 9906:2012	Organização internacional de normalização(ISO), Testes de aceitação de desempenho para bombas centrífugas.
ANSI/HI a)11.6.2012; b) 14.6.2012; c) 20.3.2012	Instituto Nacional Americano de Normas (ANSI) Instituto de Hidraulica(HI), a) Teste de aceitação de desempenho para bombas submersíveis centrifugas; b) Testes de bombas centrífugas; c) diretrizes de eficiência das bombas.

3.4 Etapa 3: Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias

Esta etapa é constituída por três passos principais – i) Avaliação da eficiência, ii) Identificação de prioridades de intervenção nas instalações elevatórias e iii) Análise de fatores que condicionam o desempenho das instalações elevatórias– que se apresentam nas seções seguintes.

3.4.1 Avaliação da eficiência

Para realizar o diagnóstico da eficiência energética das IE é necessário adotar um procedimento normalizado de avaliação de desempenho nas diferentes métricas de indicadores de desempenho apresentadas no Quadro 3.1. Destina-se a sustentar a decisão, funcionando como uma ferramenta de apoio ao estabelecimento de medidas de melhoria.

A avaliação da eficiência em IE de abastecimento de água e de águas residuais consiste na interpretação do valor do indicador de Eficiência global que avalia o comportamento das instalações elevatórias, comparando-o com valores de referência apresentados no Quadro 3.1. Este indicador é complementado com outros indicadores, para os quais foram também definidos valores de referência que irão permitir emitir um julgamento sobre o seu valor. Os indicadores complementares referidos são os seguintes: Rácio entre o caudal estimado e o caudal nominal, Q/Q_n; Variação do rendimento relativamente ao rendimento ótimo; Vida Residual, VR; e Degradação anual, D_a. Através de uma análise em que se relacione o conjunto de indicadores, será possível encontrar respostas (como se verificará nos casos de estudo), para os diferentes valores de eficiência apresentados pelas instalações elevatórias.

3.4.2 Identificação de prioridades de intervenção nas instalações elevatórias

Uma vez avaliada a eficiência das instalações elevatórias, segue-se uma análise comparativa em que se identificam os grupos considerados prioritários para intervenção. A identificação de prioridades de intervenção tem como finalidade, selecionar as IE consideradas prioritárias para depois se efetuar um diagnóstico mais detalhado em que são estudadas alternativas de intervenção.

Neste passo, analisa-se a situação atual e prevê-se a situação futura, assumindo-se não serem realizadas intervenções de reabilitação e de se manterem as práticas de operação e manutenção

atuais. Para além dos indicadores complementares, nesta fase, consideram-se também os indicadores referentes ao consumo e aos custos energéticos.

As instalações elevatórias prioritárias para análise de medidas de melhoria são as que apresentam valores mais elevados no indicador Poupança Anual, indicador de carater económico que compara a situação de funcionamento atual com a situação ótima, e, também, valores medianos ou insatisfatórios dos restantes indicadores.

No Quadro 3.5 apresenta-se um exemplo de uma tabela para organização da informação e estabelecimento de prioridades, que será aplicada aos casos de estudo. Este quadro tem os indicadores referidos, as percentagens de energia consumida dentro do total da EG, a potência elétrica disponível em cada IE e, na ultima coluna, a ordem de prioridade estabelecida de acordo com o potencial de poupança.

Quadro 3.5 Modelo de "quadro" com a identificação das instalações elevatórias prioritárias

IE	P_1 (kW)	t_f (h/ano)	Peso CE na EG (%)	η_g (%)	(%)	VR (anos)	D_a (%)	η'_0 (%)	P_p (€)	Prioridade
…										

3.4.3 Análise de fatores que condicionam o desempenho das instalações elevatórias

São várias as combinações de fatores que podem caracterizar a eficiência das instalações elevatórias entre os quais se destacam: o desvio do caudal de operação em relação ao caudal nominal, a idade das instalações elevatórias, a degradação anual, a variação do rendimento relativamente ao ótimo, o tempo anual de funcionamento, o consumo energético, a potência instalada, a qualidade de monitorização dos dados e a marca dos equipamentos.

Além do que já tem sido referenciado, a eficiência pode ser interpretada através da caracterização dos equipamentos consoante a sua potência, assim como a sua distribuição de grupos eletrobomba, nomeadamente eletrobombas a operar unitariamente ou em paralelo com 2 ou mais grupos. A potência instalada de uma IE é a potência equivalente à potencia elétrica P_1, a potência elétrica dos grupos em operação. Por exemplo, num sistema "1+1" considera-se apenas a potência de uma das bombas; num sistema "2+1" considera-se a soma de P_1 dos grupos que operam em paralelo, este caso dois grupos. As categorias de potência adotadas são as seguintes: [0;5],]5;10] e]10; +∞[kW.

Outra forma de interpretação praticada neste estudo consiste na diferenciação de análise de eficiência por marca. Espera-se que a informação proveniente da sua comparação permita apoiar a futuras decisões relacionadas com intervenções de substituição.

3.5 Etapa 4: Estabelecimento de medidas de melhoria da eficiência

Encontram-se identificados vários tipos de medidas de melhoria de eficiência energética em instalações elevatórias, designadamente: medidas infraestruturais (INF); medidas de operação (OP); medidas de manutenção (M); outras medidas não-infraestruturais (O). As *medidas infraestruturais* são entendidas como as que, do ponto de vista económico, envolvem depreciação de investimento e incluem: intervenções de construção ou reabilitação (e.g., redimensionamento ou reabilitação de troços de rede), de construção civil, de equipamento (eletromecânico, informático, instrumentação e controlo, etc.) e instalações elétricas. As medidas não-infraestruturais incluem *medidas de manutenção* (e.g., pequenas reparações, substituição de óleo do motor dos grupos eletrobomba, limpezas de órgãos), *medidas de operação* (e.g., alterar a operação da bomba para funcionar numa gama de caudais próxima do ponto ótimo) e *outras medidas não-infraestruturais* (e.g., instalação de equipamentos de mediação de caudal, energia). Apresenta-se no Quadro 3.6 uma lista de medidas e os respetivos critérios de seleção específicos para instalações elevatórias, atendendo aos indicadores de desempenho apresentados em Quadro 3.1.

Quadro 3.6 Medidas de melhoria/critérios de seleção

Medida	**Critérios para a seleção da medida**
OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência	Bombas novas ou a meio da sua vida útil, com variador de velocidade, taxa de degradação boa a mediana (<1%/ano), rendimento insatisfatório e relação Q/Q_n mediana ou insatisfatória, mas $Q/Q_n>0,5$ (em bombas com rácios inferiores, a taxa de degradação pode ser superior e ser necessário a sua substituição com redimensionamento). Bombas envelhecidas, com ou sem variador de velocidade, rendimento aceitável, taxa de degradação boa a mediana (<1%/ano) e relação Q/Q_n mediana ou insatisfatória, mas com $Q/Q_n>0,5$. Bombas novas, com ou sem variador de velocidade, taxa de degradação insatisfatória (≥1%/ano), rendimento e relação Q/Q_n insatisfatória ou mediana, com $Q/Q_n>0,5$.
OP2 – Instalação de variadores de velocidade para eliminação de energia supérflua	Bombas novas ou a meio da sua vida útil sem variador de velocidade, boa taxa de degradação (<1%/ano), rendimento e relação Q/Qn insatisfatórios, mas $Q/Q_n>0,5$ (em bombas com rácios inferiores pode ser necessário a sua substituição)
OP3 – Melhoramento do sistema de monitorização e registo de dados (energia, caudal, pressão)	Bombas com falta de informação para a sua avaliação ou com resultados inconsistentes nos indicadores utilizados no diagnóstico
INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (e.g., motor, arrancadores suaves, impulsor)	Bombas envelhecidas ou em fim de vida útil com ou sem variador de velocidade e rendimento insatisfatório. Bombas novas ou a meio da sua vida útil, com variador de velocidade, taxa de degradação insatisfatória (≥1%/ano), rendimento e relação Q/Q_n insatisfatória, com $Q/Q_n≤0,5$.
M – Manutenção	Bombas com desempenho bom, manter práticas de operação e manutenção. Bombas novas ou a meio da sua vida útil, com variador de velocidade, taxa de degradação insatisfatória(≥1%/ano), rendimento e relação Q/Q_n insatisfatória ou mediana, com $Q/Q_n≤0,5$.

Para o estabelecimento de medidas de melhoria do tipo INF, reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes, recomenda-se que seja efetuado um dimensionamento simplificado da IE. Este dimensionamento pode ser efetuado recorrendo às aplicações computacionais

disponibilizadas pelos fabricantes, como por exemplo KSB EasySelect (https://www.ksb.com/ksb-en/Select_your_pumps_and_valves/ksb-easyselect/) ou Grundfos Product-Center (https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?custid=GMA&qcid=1134692716).

Seguem-se em detalhe os passos de dimensionamento assim como as hipóteses simplificativas adotadas, usando como referência o software EasySelect da KSB (Figura 3.3):

i. Escolhe-se o tipo de aplicação (e.g. Abastecimento de água), instalação (e.g. Estação de bombeamento) e processo (e.g. transporte de água);
ii. Estabelece-se o ponto de funcionamento com base no caudal, Q, (calculado com base no volume anual bombeado e no tempo de funcionamento das bombas), e a altura de elevação H_{total}. Define-se o modo de regulação de velocidade (e.g. conversor de frequência), o tempo de funcionamento anual, o custo da energia por kWh e o perfil de carga;
iii. Segue-se a definição das condições de operação em que se introduz a altura geométrica de modo a contabilizar as perdas de carga. O NPSH disponível é um dado que terá que ser solicitado à entidade; iv) O tipo de design da IE compreende duas parcelas, o design (e.g., Sistema simples 1x100%) e o tipo de impulsor preferido (e.g. Fluxo radial);
iv. Escolhem-se os tipos de métodos construtivos que mais favorecem os requisitos do projeto (e.g. Bomba multicelular);
v. Finalmente, são geradas algumas das soluções de bombeamento, nomeadamente as condições de operação assim como os seus custos energéticos e de aquisição.

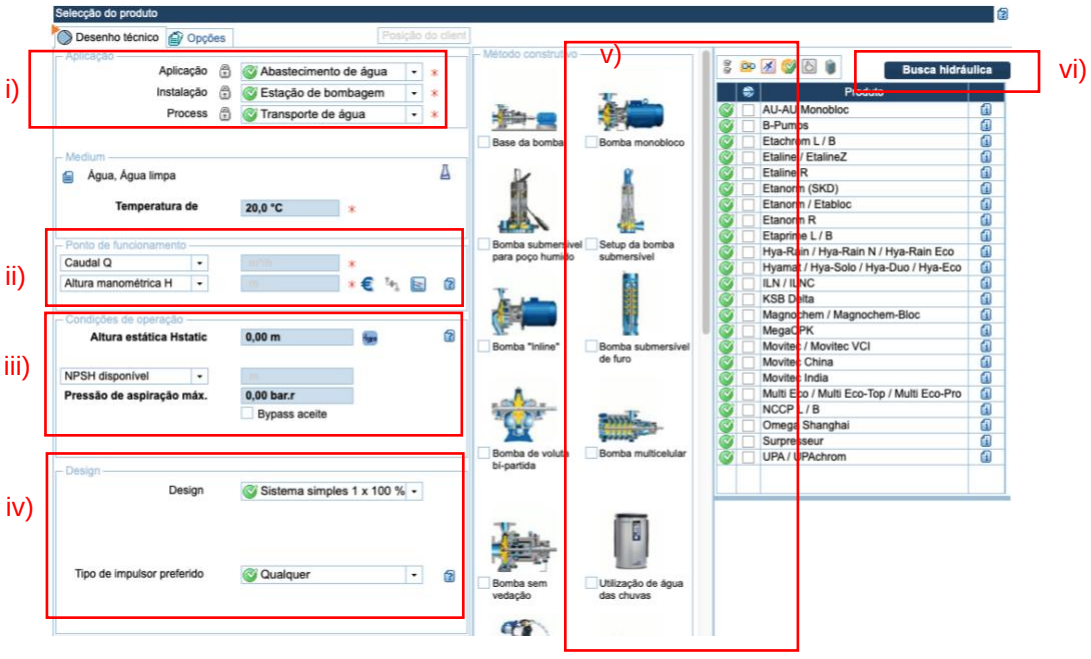


Figura 3.3 Menu principal para introdução de dados no software Easyselect KSB para o dimensionamento da IE

A metodologia inerente à seleção de uma nova solução de bombeamento através da plataforma da Grundfos, Grunfos Product-Center, é semelhante à da KSB. O dimensionamento proposto para ambas as marcas tem como principal objetivo a reduzir o consumo de energia de modo a rentabilizar o

investimento. Importa referir que não são fornecidas informações mais detalhadas, porque para esse efeito seria necessário entrar em contacto direto com a marca e efetuar um orçamento mais minucioso.

3.6 Etapa 5: Análise económica

A análise económica compreende dois passos – Cálculo dos custos no ciclo de vida de uma instalação elevatória e cálculo de indicadores económicos – apresentados nas secções seguintes.

3.6.1 Cálculo dos custos no ciclo de vida de uma IE

Os custos totais de um equipamento não incluem apenas o valor da sua aquisição e instalação. É indispensável efetuar uma avaliação de custos do seu ciclo de vida e, nessa avaliação, verifica-se que, em alguns casos, o custo de aquisição pode representar apenas 5% do custo total do ciclo de vida e que os custos energéticos podem ultrapassar 90%. Quando se comparam duas bombas que diferem apenas no seu valor de aquisição na ordem dos 10%, poderá estar em causa somente 0,5% do valor total do custo de vida útil de cada uma das bombas (Aleixo, 2013).

Os custos no ciclo de vida de uma IE incluem os custos de projeto, de construção, de operação e manutenção, de ocupação (e.g., rendas, impostos pela utilização do espaço) e de desativação; não incluem os custos associados à fase de conceção e planeamento (anteriores ao projeto) (Alegre e Covas, 2010) (Heinz e Budris, 2015) (Aleixo, 2013).

Podem ser descritos pela seguinte fórmula:

$$\mathrm{CCV} = \mathrm{Inv} + \mathrm{Cin} + \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\mathrm{Ce}_i + \mathrm{Co}_i + \mathrm{Cm}_i + \mathrm{Cs}_i + \mathrm{Camb}_i + \mathrm{Cd}_i}{(1+ta)^i} \right] \quad (3.16)$$

sendo CCV = os custos no ciclo de vida; Inv = investimento inicial; C_{in} = custo de instalação e arranque; C_e = custo de energia consumida no funcionamento do sistema; C_o = custos de operação; C_m= custos de manutenção e reparação; C_s = custo das paragens (custo de não produção); C_{amb}= custos ambientais (contaminações e equipamento de segurança); C_d= custo de desativação; n = número de anos de vida; i = ano; ta = taxa de atualização.

Todos estes custos devem ser calculados ao longo do ciclo de vida da IE e atualizados a um ano de referência, tipicamente, o ano de início de projeto, atendendo à taxa de atualização considerada.

No Quadro 3.7 apresenta-se uma descrição de cada um dos custos incluídos no ciclo de vida:

Quadro 3.7 Definição dos custos associados ao ciclo de vida de uma IE

Designação	Definição
Investimento inicial	Inclui os custos iniciais de projeto e de aquisição da bomba e do sistema de bombeamento. Os custos iniciais incluem também engenharia, processo de licitação, administração de ordens de compra, testes, inspeção, inventário de peças sobressalentes, formação e equipamento auxiliar.
Custo de instalação e arranque	Inclui os custos de instalação e colocação em funcionamento da bomba incluem as fundações, o rejuntamento, a ligação de tubagem de processo, a ligação de cabos elétricos, a ligação de sistemas auxiliares, o alinhamento do equipamento, a descarga da tubagem e a avaliação do desempenho na colocação em funcionamento. O cuidado e a eficácia na execução destas atividades de instalação terão um grande impacto sobre a fiabilidade subsequente, custos de manutenção e tempo de paragem, durante o ciclo de vida da bomba.
Custo de energia consumida no funcionamento do sistema	Refere-se ao custo da fatura energética associada à IE. O consumo de energia é frequentemente um dos maiores elementos de custo e pode dominar os custos totais do ciclo de vida, especialmente se as bombas trabalharem mais de 2000 h por ano, o que dá uma média aproximadamente de 6h por dia. Os custos de energia e manutenção durante a vida de um sistema de bomba são normalmente mais de 10 vezes o seu preço de compra. Os custos energéticos dependem não só da melhor eficiência da(s) bomba(s), mas também da energia consumida pelo sistema de bombas (tamanho da tubagem, etc.), e de quanto tempo e distância a bomba gasta a funcionar longe do melhor caudal de eficiência. Para entidades que têm instaladas bombas de grande dimensão com motores de grande potência a questão da poupança de energia é de importância primordial. Por outro lado, para os utilizadores de pequenas bombas, a poupança individual de energia é um fator de pouca importância embora, devido à grande quantidade de bombas existentes, representam uma enorme fatia da energia consumida por bombas, merecendo uma especial atenção a nível macroeconómico e ambiental.
Custos de operação (excluindo a energia)	São vistos como custos de supervisão relativos à operação do sistema e variam conforme a complexidade do mesmo, mas tendem a baixar quanto maior for o grau de automatização.
Custos de manutenção e reparação	O custo de manutenção e reparação depende do tempo e da frequência do serviço e do custo dos materiais. A conceção da bomba pode influenciar grandemente estes custos através da seleção hidráulica, materiais de construção, componentes escolhidos e a facilidade de acesso às peças a serem reparadas.
Custo das paragens	Nalguns casos, os prejuízos relativos a paragens súbitas do equipamento e à não produção são bastante relevantes e podem ganhar um peso bastante significativo no CCV.
Custos ambientais (contaminações e equipamento de segurança)	custos ambientais (contaminações e equipamento de segurança) - Este elemento varia essencialmente com a natureza do fluido bombeado, aumentando quanto maior for o risco de contaminações. Aqui devem ser considerados os custos de equipamentos auxiliares de segurança e custos associados aos riscos de contaminação.
Custo de desativação	Este elemento deverá ser contemplado na eventualidade de ser necessária a desmontagem da instalação e a reposição do ambiente natural outrora existente. Não tem grande aplicabilidade numa análise comparativa do LCC, pois o valor pouco varia em função das características do equipamento, mas deverá ser considerado no cálculo efetivo do CCV.

Segundo a KSB, é possível conseguir uma poupança de energia na ordem dos 10%, através de correta otimização dum sistema de bombeamento. Contudo, para se conseguir poupanças maiores, da ordem dos 20% a 30%, são necessários investimentos relevantes. Para compensar os investimentos de otimização, a razão C_e/C_{ic} deverá ser pelo menos pelo menos superior à unidade. De qualquer forma, o autor indica que, de acordo com a sua experiência, esta razão é normalmente superior a 10, deixando uma grande margem a considerar no investimento inicial (Aleixo, 2013).

Os custos totais do ciclo de vida depois de estimados permitem uma comparação das diferentes soluções analisadas. Existem também fatores financeiros a serem tomados em consideração no desenvolvimento custo do ciclo de vida estes incluem: preços atualizados da energia; atualização do valor anual da energia; taxa de inflação; taxa de juros; vida útil estimada do equipamento.

3.6.2 Cálculo de indicadores económicos

A análise económica deve incidir nas IE identificadas como prioritárias e com maior potencial de poupança. A análise económica centra-se na aquisição de um novo equipamento e na comparação dos seus custos com os da solução atual até ao final da sua vida útil. Para a IE identificada, devem ser selecionadas algumas soluções de diferentes condições de instalação, operação e definição de configuração da IE de modo a conferir à análise maior robustez na comparação entre possibilidades. Assim, deverá ser efetuado um plano financeiro adequado e um eventual faseamento no tempo dos investimentos, no caso de se optar por mais que uma solução de otimização (Leite, 2011).

Para realizar a análise podem ser assumidos os seguintes pressupostos:

- Os investimentos iniciais que correspondem à aquisição de um novo equipamento mais o custo de instalação ou de montagem.
- Custos de montagem são equivalentes a 30% do custo da bomba.
- Sistema de preços de mercado constantes (preço da energia).
- As receitas são equivalentes à poupança energética.
- Os equipamentos amortizam-se todos os anos o mesmo valor e no fim da vida útil o seu valor residual é zero.
- Não existe mercado se segunda mão, por isso na eventualidade de instalação de um novo equipamento o valor residual da solução atual é perdido.
- Os custos de manutenção são simplificados e assume-se que representam 5% do custo de investimento.
- Fator de atualização é 6%.
- Período de vida do equipamento equivalente a 25 anos.
- Não são considerados custos associados à instalação de válvulas, substituição de tubagens, instalação do equipamento, e de desmontagem do equipamento antigo.

A análise não só compara as soluções novas com a atual, como também as novas entre si, determinando qual a mais adequada.

São de seguida apresentados os seguintes indicadores económicos utilizados na avaliação:

- O valor atualizado líquido (VAL) é o valor acumulado atualizado à taxa de atualização adotada para o inicio do ano zero (ano de instalação do novo equipamento). O VAL é igual à diferença entre a receita e os custos (encargos anuais mais o investimento inicial), fluxo de caixa (FC), atualizados ao ano zero por uma taxa de t_a.

$$VAL = -Investimento\ inicial + \sum_{t=1}^{n} \frac{FCt}{(1+i)^t} \tag{3.17}$$

– A taxa interna de retorno ou taxa interna de rentabilidade, de sigla TIR, é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa (FCi), faz com que os valores das despesas, trazidos ao valor presente, seja igual aos valores dos retornos dos investimentos, também trazidos ao valor presente.

$$VAL = 0 \Leftrightarrow -Investimento\ inicial + \sum_{i=1}^{n} \frac{FCi}{(1+TIR)^i} = 0 \tag{3.18}$$

– Um indicador económico muito importante para comparação a comparação de soluções a adotar é o período de retorno do investimento (PRI) que é caracterizado pelo tempo em que o valor poupado por operar com soluções mais eficientes, iguala o investimento inicial. Este valor deve ser, de preferência, inferior à vida útil que ainda resta à IE atual. Quanto menor for o seu valor, mais rentável é o investimento. Idealmente deve ser inferior a 10 anos.

$$PRI = Investimento\ Total\ /\ Lucro\ Líquido \tag{3.19}$$

sendo o investimento total o preço do novo equipamento mais o valor residual perdido do equipamento atual, e o Lucro Líquido o valor da poupança por operar com uma nova solução mais económica, em relação à solução antiga.

É aconselhável, também, após a intervenção na instalação elevatória, um acompanhamento, de forma a testar a eficiência das soluções aplicadas. A aposta em manutenção preventiva nos grupos elevatórios é recomendada de modo a aumentar o período de vida expectável dos equipamentos instalados, garantindo assim poupanças significativas (Leite, 2011).

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA DIAGNÓSTICO E PRIORIZAÇÃO

4.1 Descrição dos casos de estudo

O presente capítulo tem como objetivo a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 3 recorrendo a dados fornecidos por três entidades gestoras (EG) – aqui designadas por A, B e C – responsáveis pela captação, transporte e distribuição de água para consumo público (AA) e pela recolha e transporte de águas residuais (AR). A seleção dos casos de estudo atendeu aos seguintes critérios: disponibilidade em colaborar com o LNEC e o IST de modo a garantir que os dados tratados sejam, sempre que possível, consistentes; diversificação nas análises de modo a encontrar tendências que permitam tomar decisões; trabalhar os dados assumindo margens de erro reduzidas, de modo a garantir que a análise é conservativa.

As instalações elevatórias estão distribuídas pelas três EG conforme apresentado no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 Instalações elevatórias analisadas em cada entidade gestora

Entidade gestora	Instalação elevatória
A	8 (AA), 13 (AR)
B	37 (AA), 37 (AR)
C	77 (AA), 49 (AR)

Estas três entidades participam no projeto Avaler+, razão pela qual foi possível ter acesso aos seus dados. O interesse das entidades em integrar um projeto como o Avaler+ passa por realizar avaliações de eficiência energética e sustentabilidade energética dos serviços urbanos de águas e estabelecer um quadro de referência claro, integrador e de aplicação simples para a avaliação do desempenho energético, apoio na tomada de decisão e monitorização do impacto de medidas de eficiência energética.

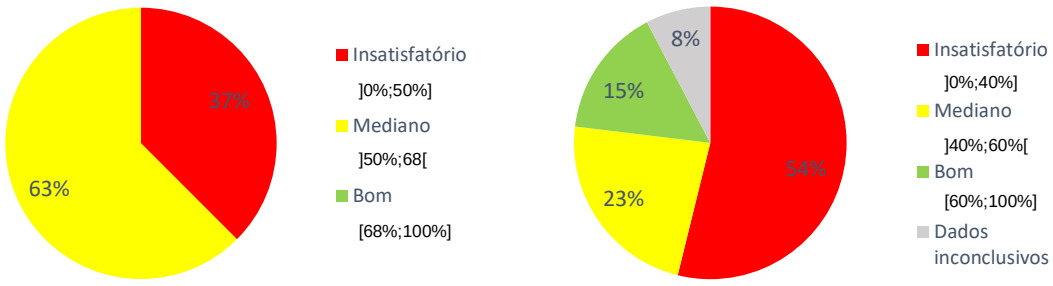
A análise de cada caso de estudo tem como ponto de partida o diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias para seguidamente se proceder à análise e proposta de medidas de melhoria.

4.2 Caso de estudo da entidade gestora A

4.2.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias

Apresentam-se na Figura 4.1 os resultados da avaliação da eficiência energética das instalações elevatórias da entidade gestora A. Verifica-se que, na maioria das IE (63%) dos sistemas de abastecimento de água, o rendimento se situa entre 50% e 68%, ou seja a eficiência é mediana. As restantes IE (37%) apresentam rendimentos abaixo de 50%, ou seja, são insatisfatórios. Nos sistemas de águas residuais, 54% das IE apresentam rendimentos abaixo de 40%, 23% das IE têm rendimentos entre 40% a 60% e apenas 15% apresentaram boas eficiências, com rendimentos acima de 60%. Nos restantes casos (8% das IE de AR) não foi possível realizar a avaliação por falta de dados ou por

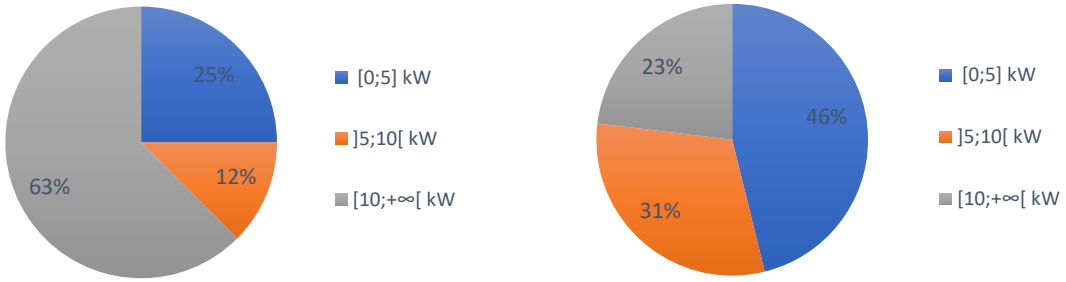
inconsistência dos valores obtidos. Sabe-se ainda que, nos sistemas de abastecimento de água, 80% das IE têm a bombas centrífugas de eixo vertical e os restantes 20%, bombas centrífugas de eixo horizontal. Nos sistemas de águas residuais, todas as bombas são do tipo submersível centrífuga e de eixo vertical.



(a) (b)

Figura 4.1 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR.

A Figura 4.2 apresenta distribuição das potências elétricas das IE para os sistemas de AA e de AR. Nos sistemas de AA, predominam as bombas de maior potência (63% do total) e a disposição dos grupos caracteriza-se por apresentar configurações de grupos em paralelo dos tipos “2+1”, “3+1” e “4+1”. No caso dos sistemas de AR, predominam bombas de menor potência (46%) e estas bombas estão geralmente associadas a funcionamentos com a configuração tipo “1+1”.



(a) (b)

Figura 4.2 Distribuição da potência elétrica instalada (P1) das IE da entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR.

Apresenta-se no Quadro 4.2 as cinco IE da entidade gestora A com piores desempenhos e candidatas a intervenção. A ordem de priorização é estabelecida pelo maior potencial de poupança anual expresso em unidades monetárias (variável P_a). A análise destes resultados permite tecer as seguintes considerações relativamente à IE de AA e de AR:

– A IE3, uma IE sobrepressora de AA, apresenta o terceiro maior consumo energético da EG (peso do consumo energético no global da EG: 12,7%), ultrapassando as 2000 h anuais de funcionamento, com um rendimento insatisfatório (20,3%), uma elevada degradação anual do rendimento (1,4%/ano) e com um ponto de funcionamento muito longe do seu melhor rendimento (η'_0=63,3%). Conjugando todos estes fatores e aliada ao facto de ser a que tem

maior potencial de poupança energética, a IE3 é prioritária (prioridade 1) para a realização de um diagnóstico mais detalhado, com vista a aumentar a sua eficiência.

– A IE5.1, também uma sobrepressora de AA, e, em comparação com a IE3, apresenta maior potência (64 kW) e maiores consumos energéticos (peso do consumo energético: 35,6%), no entanto, opera com rendimento mais elevado (66,8%) e mais próximo do seu ponto ótimo de funcionamento (η'_0=14,6%). Assim, trata-se a de uma IE com prioridade 2.
– A IE1, que opera entre reservatórios, é a segunda IE que consome mais energia (16%) e a que tem a segunda maior potência (33,5 kW). O seu diagnóstico é muito similar ao da IE5.1, mas apresenta menor potencial de poupança, pois consome menos energia, sendo de prioridade 3.
– As IE2.2 e IE2.1, ambas localizadas entre reservatórios, são compostas por equipamentos muito semelhantes, diferindo apenas na configuração dos grupos eletrobomba. Ambas apresentam resultados de diagnóstico muito semelhantes, no entanto, a IE2.2 é mais recente e apresenta taxas de degradação mais elevadas, tem um rendimento ótimo também mais elevado, sendo de prioridade 4. A IE2.1 é de prioridade 5.
– No caso das IE de AR, todas eficiências muito insatisfatórias variando entre 5,4% a 31,7%; algumas IE têm com rácios Q/Q_n aceitáveis (entre 70,7% e 112,8%), designadamente as IE1 e IE9, mas uma elevada degradação anual (caso da IE1 e IE2) e rendimentos globais afastados do seu ponto ótimo de funcionamento (η'_0 entre 50% a 80%) . O fator que mais diferencia as IE é o consumo de energia, que tem influência direta na poupança, ditando por isso a ordem de prioridades.
– De salientar que face às baixas potencias instaladas (menor que 5 kW) e ao número reduzido de horas de funcionamento (< 2000 h), as IE de AR têm muito menor potencial de poupança do que as IE de AA.

Quadro 4.2 Instalações identificadas como prioritárias em AA na da entidade gestora A

Instalação elevatória	P_1 (kW)	t_f > 2000 (h/ano)	Peso do consumo energético (%)	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR (-)	D_a (%/ano)	η'_0 (%)	P_a (€)	Prioridade
Sistema de abastecimento de água										
IE3 (3+1)	18,9	Sim	12,7	20,3 ●	118,8 ●	0,2 ●	1,4 ●	63,3	5 754,7	1
IE5.1 (4+1)	64,0	Sim	35,6	66,8 ●	87,27 ●	0,0 ●	0,2 ●	14,6	3 702,0	2
IE1 (3+1)	33,5	Sim	16,0	56,7 ●	100,6 ●	0,5 ●	0,7 ●	17,6	1 997,7	3
IE2.2 (1+1)	4,4	Sim	2,8	18,6 ●	21,28 ●	0,4 ●	0,6 ●	71,4	1 423,6	4
IE2.1 (2+1)	8,8	Sim	2,4	23,8 ●	22,0 ●	0,7 ●	0,0 ●	54,3	932,3	5
Sistema de águas residuais										
IE1 (2+1)	38,6	Sim	8,30	31,7 ●	70,7 ●	0,9 ●	13,9 ●	52,8	3120,5	1
IE11 (1+1)	9	Não	2,70	12,2 ●	DI	0,0 ●	DI	74,2	1440,0	2
IE2 (2+1)	13	Não	1,60	21,7 ●	58,5 ●	0,4 ●	2,1 ●	61,9	718,1	3
IE9 (1+1)	7,5	Não	0,60	23,1 ●	112,8 ●	0,05 ●	0,83 ●	52,8	233,6	4
IE7 (1+1)	1,5	Não	0,3	5,4 ●	174,2 ●	0,0 ●	0,4 ●	80,6	194,4	5

Nota: DI – Dados inconclusivos.

4.2.2 Propostas de medidas de melhoria

Apresenta-se no Quadro 4.3 as medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias para sistemas de AA e de AR. A análise deste quadro mostra que:

- Nos sistemas de AA, as IE3, IE5.1 e IE2.2 requerem a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (medida INF, cf. Quadro 3.6). A IE3 trata-se de uma IE antiga (VR=0,2), ineficiente (η_g=20,3%) e degradada (Da=1,4%/ano). A IE5.1 é também muito antiga (VR=0), sendo esse o fator determinante para a medida adotada, no entanto caso não seja economicamente possível efetuar uma substituição ou reabilitação desses equipamentos proceder a uma medida de ajuste operacional OP1. Para a IE2.2 esperar-se-iam rendimentos globais mais elevados e caudais mais próximos das gamas recomendadas (cf. Quadro 3.1), é uma IE que indicia sobredimensionamento.
- A IE1 de AA apresenta bons parâmetros de conservação e de operação, nomeadamente caudal bem dimensionado, eficiência mediana e degradação mediana, propondo-se por isso a continuação da boa manutenção que apresenta (medida M, cf. Quadro 3.6).
- A IE2.1 de AA opera muito longe do caudal nominal (Q/Q_n < 50%), no entanto, como ainda não apresenta grandes sinais de degradação (Da=0%/ano) e é uma IE relativamente nova (VR=0,7) propõem-se a operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (medida OP1, cf. Quadro 3.6). No caso desta medida não ser suficiente, pode ser necessário a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6).
- Relativamente aos sistemas de AR, propõe-se para a IE1, identificada como a mais prioritária, a medida de operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (Medida OP1 cf. Quadro 3.6) uma vez que se trata de uma instalação recente e com níveis de eficiência mais elevados. No caso desta medida não ser suficiente, pode ser necessário a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6).
- A IE11 de AR com falhas na monitorização dos dados (Medida OP3 cf. Quadro 3.6) e para as restantes IE, recomenda-se a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6).

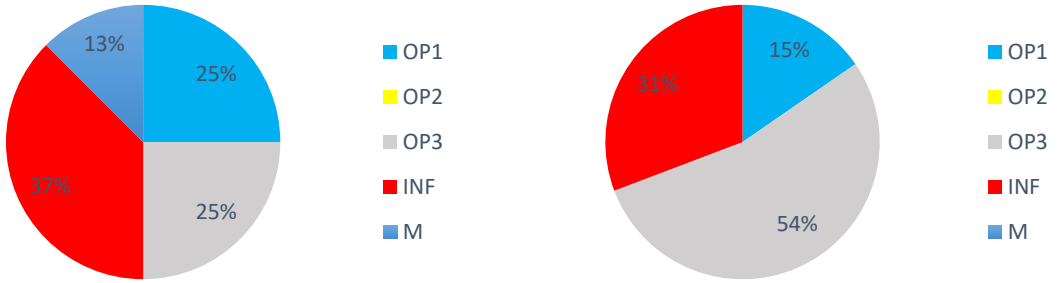
Quadro 4.3 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias em AA e AR na entidade gestora A

IE	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR (-)	D_a (%)	Medidas de intervenção propostas
Sistemas de abastecimento de água					
IE3	20,3	118,8	0,2	1,4	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE5.1	66,8	87,27	0,0	0,2	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE1	56,7	100,6	0,5	0,7	M – Manutenção
IE2.2	18,6	21,28	0,4	0,6	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE2.1	23,8	22,0	0,7	0,0	OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência
Sistemas de águas residuais					
IE1	31,7	70,7	0,9	13,9	OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência
IE11	12,2	DI	0,0	DI	OP3 – Melhoramento do sistema de monitorização e registo de dados
IE2	21,7	58,5	0,4	2,1	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE9	23,1	112,8	0,05	0,83	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE7	5,4	174,2	0,0	0,4	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes

Na Figura 4.3 são apresentadas as medidas propostas para todas as IE de AA e AR correspondentes à entidade gestora A de acordo com os critérios já mencionados.

Nas IE de AA (Figura 4.3 a), verifica-se uma predominância da medida INF (37%), 2/3 desta percentagem corresponde a IE a operar para valores de caudal muito afastados do Q_n, sendo por isso expectável eficiências reduzidas e níveis de degradação elevados. A medida de operação OP1 foi aplicada em 25% dos casos, indiciando IE mal dimensionadas com caudais de operação afastados do nominal, que com pequenos ajustamentos no caudal de funcionamento podem melhorar significativamente os níveis de desempenho sem que seja necessário efetuar intervenções infraestruturais. A medida de manutenção (M) foi recomendada em 13% das IE.

Nas IE de AR (Figura 4.3 b), verifica-se uma elevada inconsistência nos dados analisados. Predomina a medida OP3 (54%), seguida da medida INF (31%), em que os equipamentos identificados apresentam idade avançada, caudal de funcionamento muito longe do recomendado, pontualmente em estado de degradação anual elevado e com rendimentos estimados muito insatisfatórios. Por fim verifica-se que os restantes 15% refletem ocorrências de dimensionamento pouco satisfatório, sendo por isso recomendada a medida OP1.



(a) (b)

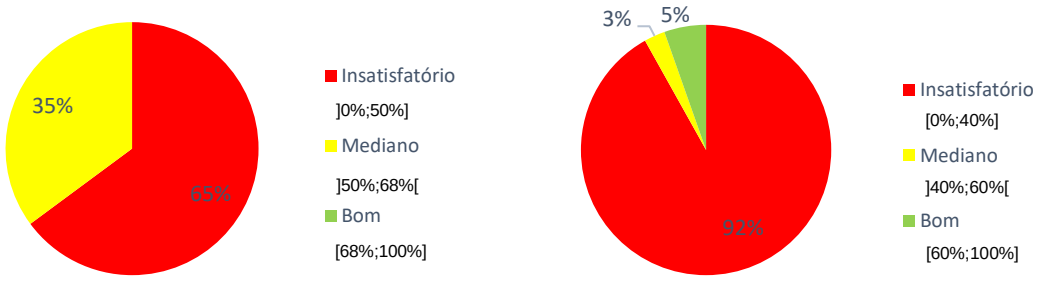
Figura 4.3 Medidas de intervenção propostas para a entidade gestora A de: (a) AA e (b) AR

4.3 Caso de estudo da entidade gestora B

A entidade gestora B é responsável pelo abastecimento de água e pela drenagem de águas residuais e pluviais no município B. É uma empresa municipal.

4.3.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias

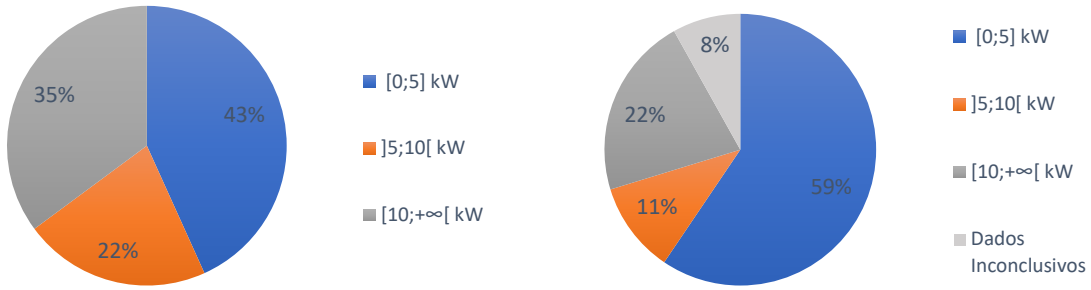
Apresenta-se na Figura 4.4 os resultados da avaliação da eficiência em IE de abastecimento de água e de águas residuais da entidade gestora B. Verifica-se que: 65%(AA) e 92%(AR) das IE apresentam rendimentos insatisfatórios, o que mostra que uma larga maioria das IE tem eficiências insatisfatórias que afetam negativamente os consumos energéticos e o desempenho da totalidade do sistema; 32%(AA) e 3%(AR) das IE operam dentro da classificação Mediana; e 5%(AR) das IE opera com eficiências com classificação “Bom”. De salientar que todos os grupos eletrobomba constituintes do sistema de AA são bombas centrífuga de eixo vertical e que as bombas das AR são submersíveis.



(a) (b)

Figura 4.4 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR.

Na Figura 4.5 apresenta-se a distribuição das potências elétricas das IE de AA e AR. Para ambos os sistemas, as IE predominantes são de potência baixa, 43%(AA) e 59%(AR), seguidas das IE de potência intermédia (entre 5 e 10 kW), 22%(AA) e 11%(AR), e as de potência mais elevada representam 35%(AA) e 22%(AR) do total. Verifica-se também que a configuração dos grupos eletrobomba é predominantemente do tipo “1+1”.



(a) (b)

Figura 4.5 Distribuição da potência elétrica P1 das IE da entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR.

Apresenta-se no Quadro 4.4 as cinco IE da entidade gestora B com piores desempenhos e candidatas a intervenção. A ordem de priorização é estabelecida pelo maior potencial de poupança expresso em unidades monetárias (variável P_a). Todas as IE de AA desta EG situam-se entre reservatórios. A análise destes resultados permite tecer as seguintes considerações relativamente à IE de AA e de AR:

- A IE5.3 é a prioritária para uma possível intervenção, visto que a combinação entre o seu baixo rendimento (53,3%) e a energia que consome (6,9% do total da EG), levam ao maior potencial de poupança (5080,6 €).
- As IE de prioridade 2 e 3 são as IE12.3 e IE11.1 que se diferenciam principalmente pelo facto de a primeira apresentar consumos energéticos maiores assim como variação de rendimento relativamente ao ótimo (η'_0), superior.
- A IE4.3, apesar de antiga (VR=0,2) e de ser a segunda que mais energia consome (4,8% do total da EG), apresenta um dimensionamento adequado, com Q/Qn muito próximo de 100%, sendo, assim, de prioridade 4.
- A IE5.1, apesar de apresentar o pior rendimento (47,5%), é ultima das prioritárias, visto que é a que menor potência instalada (12,06 kW) apresenta e é a que consome menos energia (2,5% do total da EG).
- As cinco IE de AR analisadas apresentam níveis de eficiência insatisfatórios (entre 6,5% e 17,3%), rácios Q/Q_n insatisfatórios (entre 8,7% e 51,2%) e rendimentos globais muito afastados do ponto ótimo (η'_0 entre 47,5% a 88,8%). De um modo geral, o fator que mais influencia e que mais diferencia estas IE é o consumo energético, por isso a ordem das IE prioritárias é a ordem do consumo energético e, consequentemente, é estabelecida pelo critério potencial de poupança.

Quadro 4.4 Instalações identificadas como prioritárias em AA da entidade gestora B.

Instalação elevatória	P_1 (kW)	t_f>2000 (h/ano)	Peso do consumo energético (%)	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR (-)	D_a (%/ano)	η'_0 (%)	P_a (€)	Prioridade
Sistema de abastecimento de água										
IE5.3 (1+1)	20,00	Sim	6,9	53,3	111,5	0,3	0,3	21,6	5080,6	1
IE12.3(1+1)	16,30	Sim	4,1	50,0	106,1	0,5	1,6	31,5	4388,1	2
IE11.1(1+1)	16,30	Sim	3,7	57,6	128,7	0,9	9,4	21,1	2610,9	3
IE4.3(1+1)	16,67	Sim	4,8	54,1	102,2	0,2	0,4	15,5	2517,0	4
IE5.1 (1+1)	12,06	Sim	2,5	47,5	88,0	0,4	DI	28,0	2344,9	5
Sistema de águas residuais										
IE9.1(1+1)	12,60	Sim	3,3	16,3	24,3	1,0	DI	55,9	3002,4	1
IE9.2(1+1)	8,90	Não	3,1	17,3	51,2	0,5	0,7	47,5	2375,7	2
IE9.3(1+1)	13,25	Não	1,7	12,5	8,7	1,0	7,6	77,4	2171,8	3
IE13.1(1+1)	28,00	Não	1,5	12,9	28,5	0,4	0,3	63,1	1506,3	4
IE5.13(1+1)	17,00	Não	0,5	6,5	24,1	0,5	1,5	88,8	662,3	5

Nota: DI – Dados inconclusivos.

4.3.2 Propostas de medidas de melhoria

Apresenta-se no Quadro 4.5 as medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias para sistemas de AA e de AR. A análise deste quadro mostra que:

- Recomenda-se a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6) para a IE5.3 de AA. Apresenta vida residual igual a 0,3, portanto encontra-se quase no fim de vida útil, rendimento global igual a 53,3% que é baixo para uma IE tão solicitada, levando a perdas energéticas significativas, propondo-se por isso uma substituição por equipamentos tecnologicamente mais atualizados.
- Para a IE12.3 (AA) recomenda-se também reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6), pois revela condições de serviço semelhantes à anterior, mas uma maior degradação anual (1,6%) e um maior afastamento do rendimento global relativamente ao ótimo (31,5%).
- A medida proposta para a IE11.1 (AA) é a operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (medida OP1, cf. Quadro 3.6), uma vez que se trata de uma IE nova (VR=0,9) mas que se encontra a funcionar com caudais muito acima dos nominais (=128,7%), valores que podem comprometer o funcionamento do sistema devido a problemas de cavitação.
- A IE4.3 (AA) é semelhante à IE5.3, sendo por isso proposta uma medida do tipo INF.
- A medida proposta para a IE5.1 de AA (medida OP2, cf. Quadro 3.6), uma vez que esta IE apresenta variações significativas no ponto de funcionamento decorrentes de variações de caudal e altura de elevação, e rendimentos baixos (47,5%), propondo-se por isso a instalação de um variador a velocidade.
- Relativamente às IE de AR, salienta-se um claro predomínio de reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (Medida INF cf. Quadro 3.6), em grande parte

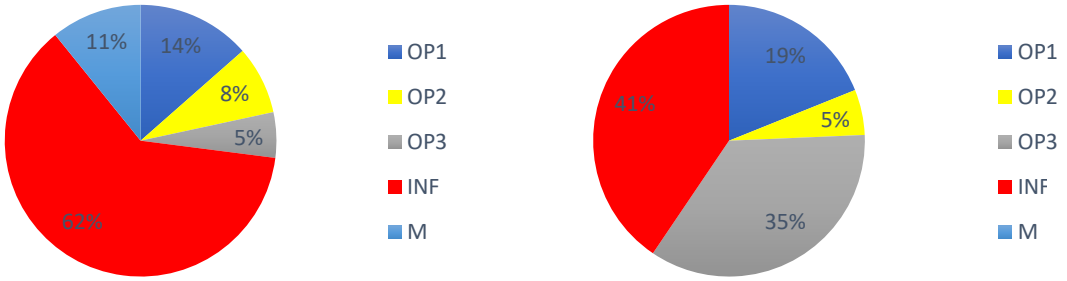
devido às baixas eficiências (entre 6,5% a 17,3%) e funcionamentos afastados do caudal nominal (entre 8% a 28%). Tratam-se de IE inadequadas e muitas vezes sobredimensionadas para o serviço que lhes é exigido. Para a IE9.2 (medida OP1, cf. Quadro 3.6), verifica-se que opera ainda dentro de caudais passíveis de correção e caso se conclua que o resultado ainda não é satisfatório, adotar-se uma medida INF.

Quadro 4.5 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias na da entidade gestora B

IE	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR (-)	D_a (%)	Medidas
Sistemas de abastecimento de água					
IE5.3	53,3	111,5	0,3	0,3	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE12.3	50,0	106,1	0,5	1,6	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE11.1	57,6	128,7	0,9	9,4	OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência
4.3	54,1	102,2	0,2	0,4	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
5.1	47,5	88,0	0,4	DI	OP2 – Instalação de variadores de velocidade para eliminação de energia supérflua
Sistemas de águas residuais					
IE9.1	16,3	24,3	1,0	DI	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE9.2	17,3	51,2	0,5	0,7	OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência
IE9.3	12,5	8,7	1,0	7,6	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE13.1	12,9	28,5	0,4	0,3	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE5.13	6,5	24,1	0,5	1,5	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes

Nota: DI – Dados inconclusivos.

Na Figura 4.6 são apresentadas as medidas propostas para todas as IE de AA e AR correspondentes à entidade gestora A de acordo com os critérios já mencionados. A medida que é maioritariamente adotada é a INF: 62% dos casos para IE de AA e 41% para IE de AR, visto que, em ambos os sistemas, existem muitas IE a operar em más condições, em fim de vida útil, com elevada degradação, eficácia e eficiência insatisfatórias, propondo-se por isso intervenções ao nível da reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba e dos seus componentes. São propostas medidas de operação OP1 em 14% dos casos para IE de AA e 19% para IE de AR e a instalação de variadores de velocidade OP2 em 8% dos casos para IE de AA e 5% para IE de AR. Propõe-se medidas de manutenção apenas para 11% dos casos de AA e o melhoramento do sistema de monitorização e registo de dados (OP5) em 5% dos casos para IE de AA e 35% dos de AR.



(a) (b)

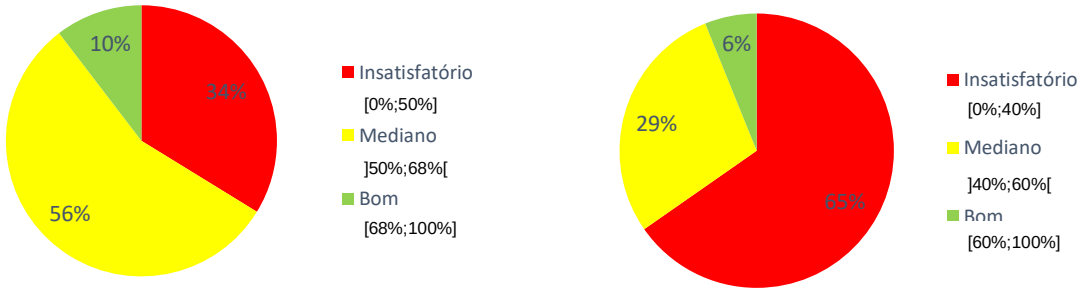
Figura 4.6 Medidas de intervenção propostas para a entidade gestora B de: (a) AA e (b) AR

4.4 Caso de estudo da entidade gestora C

A entidade gestora C é responsável pelo abastecimento de água e drenagem de águas residuais e pluviais no município C. A entidade compromete-se a assegurar o abastecimento de água para consumo humano em qualidade e quantidade assim como assegurar um eficaz e sustentável sistema de drenagem das águas residuais urbanas de um modo ambientalmente sustentável.

4.4.1 Diagnóstico e identificação de instalações elevatórias prioritárias

Apresenta-se na Figura 4.7 os resultados da avaliação de eficiência para as IE da entidade gestora C. Verifica-se que: 34%(AA) e 65%(AR) das IE operam dentro de valores classificados como insatisfatórios; 56%(AA) e 29%(AR) das IE apresentam rendimentos Medianos; 10%(AA) e 6%(AR) das IE têm uma eficiência "Bom". A maioria das IE de AA operam dentro de valores de rendimento entre 50% e 70% e as IE de AR têm uma tendência generalizada para apresentar rendimentos abaixo de 40%. As bombas das IE de AA são de vários tipos: bombas centrifugas submersíveis (16%) correspondentes a captações subterrâneas, bombas centrífugas de eixo horizontal (26%) e centrífugas de eixo vertical (58%). As bombas das IE de AR são de tipo submersível, eixo vertical, (95%) e instaladas em poço seco (5%).

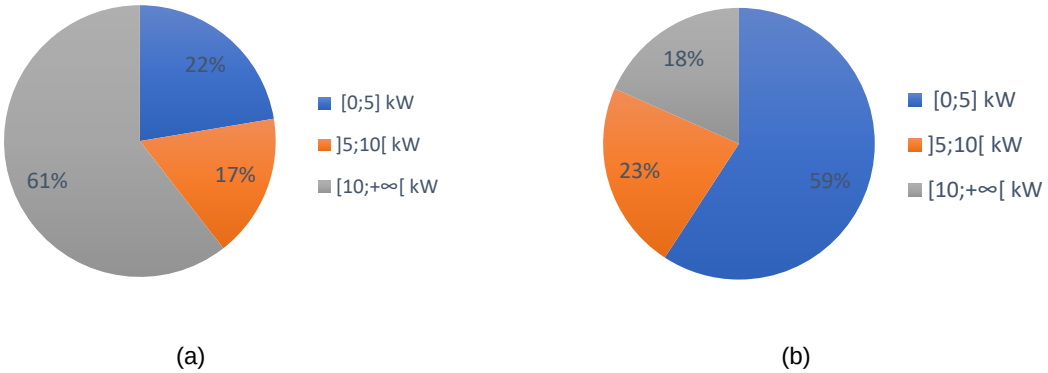


(a) (b)

Figura 4.7 Avaliação da eficiência de instalações elevatórias da entidade gestora C de: (a) AA e (b) AR.

Na Figura 4.8 apresenta-se a distribuição das potências elétricas das IE para AA e AR. Verifica-se predominância para IE de maior potência em AA (61%) e de menor potência em AR (59%). Verifica-se

também que as configurações dos grupos eletrobomba presentes nos sistemas são dos tipos “1+1”, “2+1”, “3+1” e “1+0” para as captações subterrâneas.



(a) (b)

Figura 4.8 Distribuição da potência elétrica P1 das IE da entidade gestora C de: (a) AA e (b) AR.

Apresentam-se no Quadro 4.6 as cinco IE da entidade gestora A com piores desempenhos e candidatas a intervenção. A ordem de priorização é estabelecida pelo maior potencial de poupança anual expresso em unidades monetárias (variável P_a). Todas as IE de AA desta EG situam-se entre reservatórios. A análise destes resultados permite tecer as seguintes considerações relativamente à IE de AA e de AR:

- A IE prioritária é a IE5.2. Apesar desta IE ter um rendimento “mediano” (η_g=58%), é a mais potente (180 kW) e também a que mais consome energia de toda a entidade (12,12%), concluindo-se deste modo, que uma melhoria do seu rendimento terá associada uma considerável poupança económica.
- A prioridade 2 é atribuída à IE4.4. Apesar desta IE ser semelhante à anterior, é responsável por consumos energético inferiores (6,1%).
- A terceira candidata a intervenção é a IE6.6. Esta é a terceira IE que mais consome energia (3,7%), a única que apresenta rendimento insatisfatório (η_g=44,9%) e a que mais longe opera do rendimento ótimo (Q/Qn=29,8%).
- As IE6.2 e IE6.3 têm baixas potências instaladas (41 e 33 kW, respetivamente). Apesar do consumo energético ser mais elevado na IE6.3 (3,6%), a IE prioritária é a que menos consome energia a IE6.2 (2,9%), devido à maior variação de rendimento relativamente ao rendimento ótimo (η'_0 = 24,9%) que é determinante no valor final de potencial de poupança anual (4670,4€).
- As IE de AR analisadas apresentam eficiências abaixo de 50%, relações Q/Qn insatisfatórios ou muito insatisfatórias (entre 7% e 51%) e potenciais de poupança anuais baixos (entre 400€ a 900€). A IE de prioridade 1 é a IE2.7 uma vez que apresenta um rendimento global demasiado baixo (1,3%) suscitando dúvidas quanto à qualidade dos dados desta IE. As restantes apresentam potenciais de poupança anuais muito semelhantes, diferenciando-se pelo fator consumo energético ou pela variação de rendimento relativamente ao ótimo.

Quadro 4.6 Instalações identificadas como prioritárias em AA da entidade gestora C.

IE	P_1 (kW)	t_f>2000 (h/ano)	Peso do CE na EG (%)	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR(-)	D_a (%/ano)	η'_0(%)	P_a (€)	Prioridade
Sistema de abastecimento de água										
IE5.2(3+1)	180,00	Sim	12,1	58,0 🟡	97,5 🟢	0,3 🔴	0,3 🟢	15,4	11869,1	1
IE4.4(1+1)	83,30	Sim	6,1	61,9 🟡	95,0 🟢	0,5 🟡	1,5 🔴	23,6	9230,3	2
IE6.6(1)	24,44	Sim	3,7	44,9 🔴	86,6 🟡	0,5 🟡	1,1 🔴	29,8	7143,8	3
IE6.2(2+1)	41,00	Sim	2,9	54,1 🟡	104,8 🟢	0,4 🟡	0,5 🟡	24,9	4670,4	4
IE6.3(1+1)	33,33	Sim	3,6	57,5 🟡	80,0 🟡	0,4 🟡	0,6 🟡	17,8	4073,8	5
Sistema de águas residuais										
IE2.7(1+1)	4,67	Não	0,2	1,3 🔴	7,8 🔴	0,8 🟢	2,7 🔴	97,6	898,2	1
IE2.1(1+1)	8,22	Não	0,3	33,7 🔴	38,7 🔴	0,7 🟢	0,0 🟢	39,8	454,6	2
IE1.7(1+1)	24,4	Não	0,4	31,6 🔴	51,2 🔴	0,5 🟡	13,0 🟢	28,3	440,4	3
IE1.8(1+1)	8,22	Não	0,2	19,7 🔴	15,0 🔴	0,5 🟡	0,1 🟢	55,1	435,6	4
IE11.1(1+1)	4,78	Não	0,2	18,8 🔴	31,6 🔴	0,7 🟢	0,6 🟡	47,8	409,8	5

4.4.2 Propostas de medidas de melhoria

Apresenta-se no Quadro 4.7 as medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias para sistemas de AA e de AR. A análise deste quadro mostra que:

- Para a IE5.2 de AA, é inicialmente proposta uma medida de operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (medida OP1, cf. Quadro 3.6), porque apesar de ser uma IE antiga e de apresentar um bom dimensionamento, estima-se que qualquer ponto percentual de rendimento ganho possa ter um grande impacto na poupança final, no entanto pelo facto da IE ser antiga e estar perto das suas melhores capacidades e mesmo assim não se equiparar a soluções mais atuais, caso a EG esteja disponível para um investimento superior, propõe-se uma substituição do equipamento por um que apresente níveis de eficiência nominais superiores (medida INF, cf. Quadro 3.6).
- Para a IE4.4 de AA, reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes (medida INF, cf. Quadro 3.6) é a proposta indicada, pois esta IE apresenta uma elevada degradação anual (1,5%) e está a meio da sua vida útil (VR=0,5%), por isso estima-se que alguns dos danos causados pela degradação possam não ser reparáveis com simples manutenção.
- A IE6.6 carece da melhor monitorização de dados (medida OP5, cf. Quadro 3.6).
- Para a IE 6.2 propõe-se manutenção (medida M, cf. Quadro 3.6) uma vez que esta IE apresenta níveis de aceitáveis de desempenho (Q/Qn=104,8%, η_g=54,1% e D_a=0,5) e encontra-se aproximadamente a meio da sua vida útil (VR=0,4).
- A medida de operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (medida OP1, cf. Quadro 3.6), é recomendada para a IE6.3, uma vez que se prevê que uma aproximação do

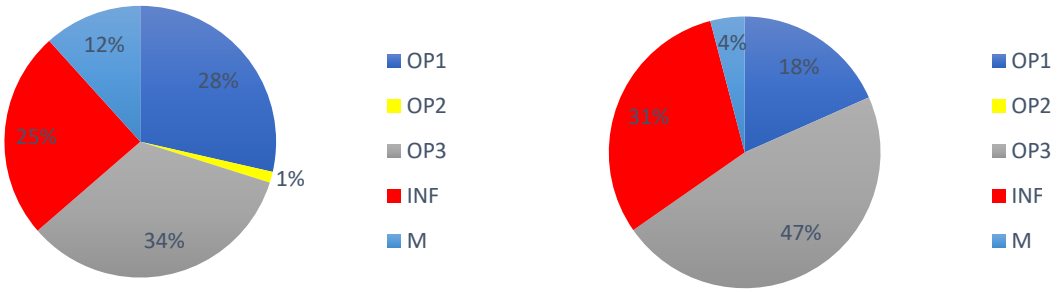
caudal de operação às condições ótimas de funcionamento, possa aumentar consideravelmente a eficiência.

– As IE de AR caracterizam-se por serem pouco eficientes e operarem longe do seu melhor ponto de funcionamento. Encontram-se entre o meio e o início da sua vida útil (VR entre 0,5 e 0,8). A medida INF, de reabilitação ou substituição dos grupos eletrobomba e seus componentes é proposta para quatro destas IE, tendo em consideração o seu sobredimensionamento. Para a IE2.1 propõe-se a medida OP3, melhoria do sistema de monitorização e registo de dados, uma vez que esta apresenta problemas de ordem de monitorização.

Quadro 4.7 Medidas propostas para as IE identificadas como prioritárias para a entidade gestora C.

IE	η_g (%)	Q/Qn (%)	VR (-)	D_a (%)	Medidas
Sistemas de abastecimento de água					
IE5.2	58,0	97,5	0,3	0,3	OP1 ou INF – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência ou reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE4.4	61,9	95,0	0,5	1,5	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE6.6	44,9	86,6	0,5	1,1	OP3 – Melhoramento do sistema de monitorização e registo de dados
IE6.2	54,1	104,8	0,4	0,5	M – Manutenção
IE6.3	57,5	80,0	0,4	0,6	OP1 – Operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência
Sistemas de águas residuais					
IE2.7	1,3	7,8	0,8	2,7	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE2.1	33,7	38,7	0,7	0,0	OP3 – Melhoramento do sistema de monitorização e registo de dados
IE1.7	31,6	51,2	0,5	13,0	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE1.8	19,7	15,0	0,5	0,1	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes
IE11.1	18,8	31,6	0,7	0,6	INF – Reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes

Na Figura 4.9 são apresentadas as medidas propostas para todas as IE de AA e AR correspondentes à entidade gestora A de acordo com os critérios já mencionados. Verifica-se que 34%(AA) e 47%(AR) das IE apresenta problemas no sistema de registo e monitorização de dados, sendo recomendada a medida OP5; 25%(AA) e 18%(AR) das IE tem necessidades de ajustes operacionais, recomendando-se a medida OP1; a medida INF é proposta para 25%(AA) e 31%(AR), tratando-se de intervenções reabilitação ou substituição; 12%(AA) e 4%(AR) das IE apresentam boas condições de operação, necessitando apenas de manutenção (medida, M). Por último, apenas 1%(AA) poderá beneficiar da instalação de um variador de frequência, medida OP2.



(a) (b)

Figura 4.9 Medidas de intervenção propostas para EG-C de: (a) AA e (b) AR

4.4.3 Substituição da IE 5.2

Uma das intervenções propostas para a IE5.2 é do tipo OP1, ou seja, operação de grupos eletrobomba no ponto de máxima eficiência (Quadro 4.7), no entanto caso as melhorias associadas a esta medida não sejam suficientes, esta pode ser complementada por uma medida do tipo INF, ou seja, a reabilitação ou substituição de grupos eletrobomba ou seus componentes.

A decisão de efetuar uma análise exemplificativa apenas nesta IE decorre do facto de se tratar daquela que, de entre as várias IE analisadas incluindo as EG anteriores, apresentar o maior potencial de poupança e ser, portanto, de prioridade 1. Apesar de apresentar uma eficiência mediana, esta IE apresenta um elevado consumo de energia e, pequenos ganhos em eficiência, têm peso significativo na fatura final. A idade da IE para o ano em estudo é 17 anos, verificando-se uma vida residual de 8 anos (vida útil para AA é equivalente a 25 anos). Esses 8 anos vão ser fundamentais para determinar se as soluções propostas compensam o investimento. A instalação atual, está dimensionada para um funcionamento total de 42 h diárias, tendo entre 2 a 3 grupos a funcionar em paralelo. Apresenta um volume anual bombeado equivalente a 920 777 m^3, consumo energético de 583911 kWh/ano e um rendimento estimado de 58%.

O dimensionamento da nova solução de bomba a instalar segue a metodologia descrita em 3.5. Os dois fabricantes de bombas considerados são a KSB e a Grundfos. Para cada uma das marcas, são analisadas quatro disposições diferentes de grupos eletrobomba:

- Configuração do tipo “1+0” constituída por uma bomba única.
- Configuração do tipo “1+1” constituída por uma bomba única e uma igual de reserva.
- Configuração do tipo “2+0” constituída por uma unidade dupla em que duas bombas iguais trabalham em paralelo.
- Configuração do tipo “2+1” constituída por uma unidade dupla em que duas bombas iguais trabalham em paralelo e uma igual de reserva.

As bombas selecionadas são de tipos: i) bombas horizontais de acoplamento com entrada axial em conformidade com a EN733, nomeadamente a KSB Etanorm e a Grundfos NK; e ii) bombas centrífugas de alta pressão, multicelulares, verticais, nomeadamente a KSB Multitec e a Grundfos CR.

Para efeitos de dimensionamento, assumiu-se que: as bombas operam sempre com o caudal nominal, durante 18 horas por dia, sendo este caudal Q = 140 m^3/h, satisfazendo por isso o volume anual bombado pela estação existente; o desnível geométrico é H_{geo}=110 m e a perda de carga total é ΔH = 25 m, resultando numa altura de elevação H_{total} = 135 m; o preço da energia é a 0,132€/kWh.

As IE podem ou não ser ter incorporado um variador de velocidade visto que a simulação é para velocidade fixa, carga total e é localizada entre reservatórios. Para algumas das soluções identificadas, pode ser vantajoso trabalhar a velocidade constante abaixo de 50 HZ, nesse caso não abdicar do variador de velocidade. Apresentam-se no Quadro 4.8 várias soluções de grupos eletrobomba para a substituição dos atualmente existentes na IE5.2 da entidade gestora C.

Quadro 4.8 Soluções de grupos eletrobomba para a substituição dos existentes na IE5.2 da entidade gestora C.

Solução	Configuração	Marca e modelo	Dimensões	$\eta_{Esperado}$ (%)	Existência de variador de velocidade	Q/Qn (%)	Ganho de η em relação ao atual (%)
1.1	1(opera isolado)	KSB, Etanorm	80-65-315	68 🟡	Não	87🟡	10
1.2	1(opera isolado)	KSB, Movitec	125	73🟢	Sim	93🟡	15
1.3	1+1(opera com bomba de segurança)	KSB, Movitec	125	73🟢	Sim	93🟡	15
1.4	2(opera em paralelo)	KSB, Movitec	90	69🟡	Sim	75🟡	11
1.5	2+1(opera em paralelo com 1 de segurança)	KSB, Movitec	90	69🟡	Sim	75🟡	11
2.1	1(opera isolado)	Grundfos, NK	65-315	66🟡	Sim	78🟡	8
2.2	1(opera isolado)	Grundfos, CR	185-4-3	76🟢	Sim	85🟡	18
2.3	1+1(opera com bomba de segurança)	Grundfos, CR	185-4-3	76🟢	Sim	85🟡	18
2.4	2(opera em paralelo)	Grundfos, CR	64-7-2	73🟢	Sim	92🟡	15
2.5	2+1(opera em paralelo com 1 de segurança)	Grundfos, CR	64-7-2	73🟢	Sim	92🟡	15

Após determinadas as possíveis soluções de substituição para as duas marcas estabelecidas, calculam-se os respetivos custos de investimento, de energia anual consumida e os indicadores económicos. Para o efeito, assumiram-se os seguintes pressupostos: o preço de compra de energia no ano de referência é de 0,132 €/kWh; a energia anual consumida e o custo dos equipamentos são obtidos estimados pelos softwares de seleção das bombas; amortização dos equipamentos é igual todos os anos até que o valor residual chegue a zero no ano 25; a taxa de atualização é 6%; custo de manutenção equivalente a 5% anual do investimento inicial; o investimento inicial corresponde ao preço inicial dos equipamentos mais custos de instalação (30% do preço inicial dos equipamentos); equipamento atual ainda tem 8 anos de vida residual, assumindo-se que ainda vale 19136 €; 25 anos (vida útil).

Com base nestes pressupostos são calculados: o custo energético anual (C_e); a poupança energética anual (P_e) resultante da diferença entre gastos energéticos anuais atuais e os estimados pela nova solução; o VAL atualizado a 6% ao fim de 8 anos que representa os benefícios económicos atualizados associados a cada nova solução em comparação a atual; o período de retorno de investimento (PRI) em anos e a taxa interna de retorno (TIR). Apresentam-se os resultados no Quadro 4.9.

Verifica-se que para o caudal bombeado, e especialmente o facto das alturas de elevação serem muito elevadas, o ideal passa pela escolha de bombas centrífugas verticais multicelulares. No entanto, todas as soluções apresentadas cumprem os requisitos operacionais, por isso superam a eficiência existente na IE atual e apresentam benefício económico. As soluções que oferecem maior beneficio económico são a 1.2 e a 2.2, constituídas por bombas centrifugas de eixo vertical que operam isoladas, numa configuração do tipo "1+0". No entanto, sabendo que se trata de uma IE muito importante para os consumidores, será impensável na eventualidade de avaria que o funcionamento seja interrompido, assim, opta-se pela mesma solução, mas com uma bomba de segurança, ou seja a 1.3 ou 2.3 ou ainda a 1.5 ou 2.5. Os fluxos de caixa e os fluxos de caixa acumulados são apresentados no Anexo C.

Quadro 4.9 Análise económica das soluções propostas para a substituição da IE 5.2 da EG C

Solução	Energia consumida (kWh/ano)	Preço dos equipamentos e instalação (€)	Custo anual da energia (€/ano)	P_e primeiro ano (kWh/ano)	$VAL_{6\%}$ 8 anos (€)	TIR (%)	PRI (anos)
1.1	495484,00	28 600,00	65 403,00	88 427,00	42 355,00	23,07	4,00
1.2	455891,28	39 000,00	60 177,52	128 019,72	65 613,00	27,14	4,00
1.3	455891,28	78 000,00	60 177,52	128 019,72	31 142,00	12,07	7,00
1.4	486694,00	33 800,00	64 242,00	97 217,00	44 969,00	22,24	4,00
1.5	486694,00	50 700,00	64 242,00	97 217,00	30 032,00	14,25	6,00
2.1	525500,00	28 600,00	69 366,00	58 411,00	17 746,00	13,40	6,00
2.2	461128,79	35 100,00	60 869,00	122 782,21	64 766,00	28,40	4,00
2.3	461128,79	70 200,00	60 869,00	122 782,21	33 742,00	13,16	6,00
2.4	484848,48	34 145,20	64 000,00	99 062,52	46 167,00	22,54	4,00
2.5	484848,48	52 219,00	64 000,00	99 062,52	31 076,00	14,46	6,00

4.5 Síntese de resultados

Efetuou-se o diagnóstico para as IE de três entidades gestoras diferentes e compararam-se os desempenhos de várias IE de abastecimento de águas e de águas residuais.

Comparando as IE de AA das três EG, conclui-se que as IE da EG-C são as que melhores rendimentos apresentam: 56% das IE operam para rendimentos entre 50-68% e 10% das IE a operar com rendimentos superiores a 68%. A segunda que melhores rendimentos apresenta é a EG-A e, por fim, a EG-B. A EG-C consome oito vezes mais energia do que a EG-B e treze vezes mais do que a EG-A, e, por isso, é composta por IE de maior capacidade (geralmente com melhores rendimentos). No estudo de identificação de IE prioritárias, as que apresentaram maior potencial de poupança anual são as da

EG-C, pois são as que mais energia consomem. Verifica-se também que, para a EG-A, os dados fornecidos e existentes não são os suficientes para diagnosticar a situação real, visto que é uma IE muito afetada pelos consumos sazonais. A EG-B é a que apresenta maior percentagem de IE com potências abaixo de 5 kW, sendo essa uma das razões para apresentar os piores rendimentos. A EG que apresenta melhor registo de dados é a EG-B. Relativamente as IE de AR das três EG, conclui-se que predominam eficiências muito baixas, em particular para a EG-B, com 92% das suas IE a operarem para valores de rendimento global abaixo de 40%. As IE identificadas como prioritárias da EG-C apresentaram potenciais de poupança baixos, visto que o consumo energético é baixo. O registo de dados é muito pouco fiável para as três EG. As potências instaladas são relativamente baixas e os grupos eletrobombas utilizados já têm rendimentos associados ao ponto ótimo de funcionamento, geralmente, baixos.

Conclui-se ainda que o dimensionamento simplificado de uma nova solução para a IE 5.2 revelou ser uma boa solução, conduzindo à redução de consumos energéticos sem comprometer os requisitos, foi dada preferência a uma solução multiestágio e de configuração “1+1”.

Globalmente as IE de AA apresentam, rendimentos superiores, caudais de funcionamento mais próximos do nominal e dados mais consistentes do que para a análise em AR. Algumas das razões para justificar estes rendimentos mais elevados estão associadas ao tipo de bombas utilizadas, que representam investimentos mais elevados do que nas AR, rendimentos esperados também mais elevados, ao permanente controlo(manutenção), e também pelo facto do líquido elevado ser água limpa, minimizando por isso perdas de eficiência no transporte do fluido. Por oposição, nas IE de AR, o líquido transporta resíduos, o que implica que a IE apresente em determinados modelos de eletrobomba, condições especiais para triturar os detritos e bombeá-los em seguida, perdendo alguma eficiência nesse processo. Adicionalmente, os caudais e alturas de elevação associados ao abastecimento de água são mais elevados, e, portanto, as IE têm instaladas potências superiores com equipamentos que se caracterizam por apresentar rendimentos superiores aos das AR. Por consequência, o consumo energético é muito superior nas IE de abastecimento de água, sendo por isso expectável que as EG centrem mais atenção nestes sistemas e que garantam manutenção mais adequada dos equipamentos. Também a manutenção é mais acessível no caso de IE de AA visto que são geralmente eletrobombas de superfície, enquanto que as AR são, na maioria dos casos, grupos submersíveis. Também o registo de dados é mais fiável nas IE de AA.

5 ANÁLISE DE FATORES QUE CONDICIONAM O DESEMPENHO DAS INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS

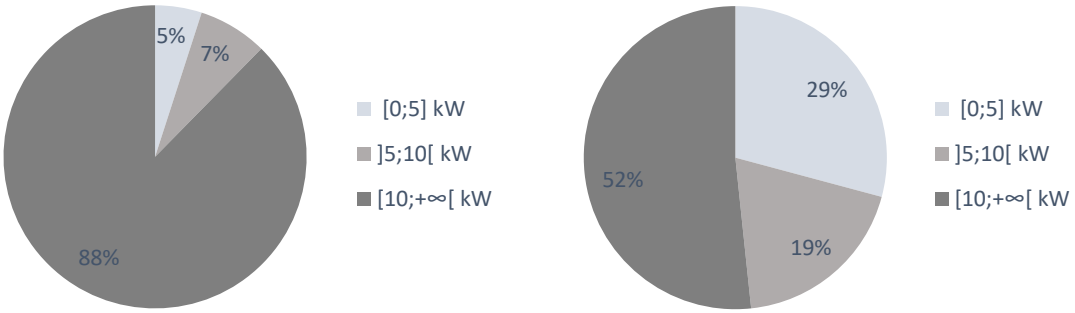
5.1 Nota introdutória

Neste capítulo analisam-se alguns dos fatores identificados na metodologia (em 3.4.3) que se consideram mais determinantes na avaliação desempenho energético das instalações elevatórias. Os resultados apresentados referem-se à totalidade das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água e de sistemas de águas residuais analisadas por entidade gestora no capítulo anterior. Estas instalações correspondem no total a 122 instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água (Anexo A) e a 99 instalações elevatórias de sistemas de drenagem de águas residuais (Anexo B). As instalações elevatórias (conjunto de grupos, em geral com caracteristicas semelhantes, podendo ser associados em paralelo e que se destinam a elevar água para um mesmo setor de rede) correspondem na sua maioria (80% do total das IE) a bombas centrífugas verticais e os restantes 20% a bombas centrífugas horizontais. Encontram-se instaladas a jusante de reservatórios e na rede, podem elevar para reservatórios ou para a rede. Apenas se incluíram na análise as IE que apresentaram dados fiáveis. São adotados indicadores de desempenho na análise que se orientam por valores de referencia definidos no Quadro 3.1. A potência instalada referida ao longo da análise caracteriza a potência elétrica disponível nas IE.

A análise encontra-se estruturada da seguinte forma: i) avaliação global da eficiência, em que se analisa e classifica eficiência global para todas as IE de cada tipo de sistemas (AA ou AR), os consumos energéticos associados a cada classificação e por fim uma análise geral de como os rendimentos e os consumos variam consoante as potencias instaladas nas IE; ii) avaliação global de Q/Qn, a sua variação consoante a potência instalada e influência que este indicador exerce sobre a eficiência; iii) avaliação global vida residual das IE e da degradação; iv) análise da eficiência para as marcas presentes nos casos de estudo. A análise divide-se em abastecimento de água e drenagem de águas residuais.

5.2 Análise global das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água

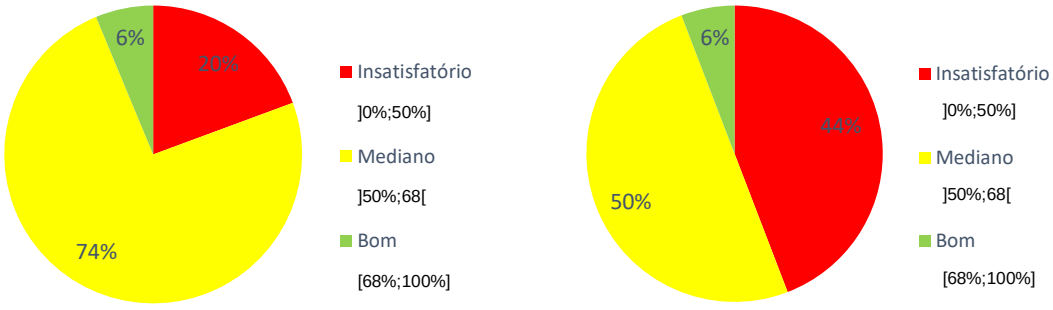
A Figura 5.1 é apresentada a energia consumida por cada classe de potência (a) e a distribuição de IE por classe de potência (b). Verifica-se que 88% do consumo de energia corresponde a IE com uma potência instalada superior a 10 kW e apenas 12% do consumo de energia corresponde a IE com potências instaladas abaixo de 10 kW (Figura 5.1 a). As IE com potência abaixo de 10 kW representam 48% das IE, e são maioritariamente sobrepressoras, que operam para períodos de funcionamento reduzidos e instáveis. A parcela composta por IE com potências superiores a 10 kW abrange 52% da totalidade. Verifica-se assim que as IE com maior potência são as que consomem mais energia.



a) b)

Figura 5.1 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água por: a) consumo de energia por intervalo de potência b) Quantidade de IE por intervalo de potência

Na Figura 5.2 é apresentada a distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética, para consumo energético (a) e por número de instalações elevatórias (b). Verifica-se que 74% da energia consumida pelas IE é assegurada por IE com um desempenho "Mediano" em termos de eficiência energética, que sugere que o potencial de redução do consumo de energia por melhoria de eficiência possa ser significativo. Acresce que existe também uma fração significativa do consumo de energia (20%) com valores de rendimento global "Insatisfatório". Apenas 6% da energia consumida corresponde a rendimentos globais "Bom". Verifica-se que a energia dissipada por ineficiência nas IE é elevada, sendo por isso conveniente definir estratégias de melhoria para aumentar os rendimentos. Em termos de número (Figura 5.2), as IE com desempenho "Insatisfatório" representam 44% da totalidade das IE, indicando que existe um número significativo de instalações que devem ser alvo de estudo de medidas de melhoria. Analisando a maior fatia do gráfico, verifica-se que 50% das IE operam dentro da gama "Mediano". Apenas 6% corresponde à melhor classificação de eficiência ("Bom" o que demonstra que existe uma grande margem de melhoria ao nível da redução de perdas energéticas.



a) b)

Figura 5.2 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética para: a) consumo energético b) Quantidade de IE

A Figura 5.3 ilustra a evolução da mediana dos rendimentos globais e ótimo para as diferentes classes de potência. Observa-se que à medida que a potência instalada das IE aumenta, o rendimento global

e ótimo aumentam. As IE cujo rendimento estimado se encontra mais próximo do rendimento ótimo correspondem às de maior potência. Uma das razões deve-se às IE com maior potência poderem estar a operar em pontos de funcionamento mais próximos do ótimo. No caso da IE com menor potência, o facto de poderem estar sobredimensionados, ou de representarem sobrepressoras com pontos de operação mais instáveis, nomeadamente pressões dinâmicas, caudais variáveis ou tempos de operação mais irregulares (a média de tempo de funcionamento para as potências abaixo de 5 kW é 4,2h, entre 5 e 10 kW 6,1h e para maior que 10 kW é 8h) são algumas das razões que justificam valores de eficiência rendimentos inferiores nos equipamentos com menor potência.

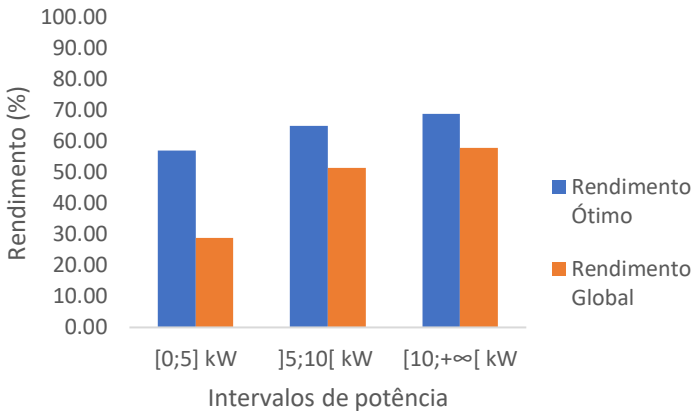


Figura 5.3 Variação do rendimento global e ótimo por classe de potência em IE de sistemas de abastecimento de água

Efetuou-se o estudo do rácio entre o caudal estimado e o nominal, Q/Qn, para analisar o desvio entre o caudal médio de operação e o caudal nominal de dimensionamento e poder identificar melhor que fatores influenciam a eficiência. Por essa razão, este indicador designa-se por ID complementar. A Figura 5.4 apresenta a avaliação deste indicador para as diferentes gamas de potência. A Figura 5.5 ilustra a avaliação do rácio Q/Qn para a totalidade das IE de sistemas de abastecimento de água, em conformidade com os valores de referência definidos no Quadro 3.1.

Relativamente aos intervalos de potência (Figura 5.4), verifica-se que é no intervalo das IE com menor potência (inferior a 5 kW) que existe uma maior proporção de IE (aproximadamente 68%) cujo rácio Q/Qn se classifica dentro da gama insatisfatória (“Muito Insatisfatório, “Insatisfatório –“ e “Insatisfatório +”). Ainda nesta classe de potência apenas cerca de 10% das IE apresentam um desempenho “Bom” relativamente ao rácio Q/Qn. Observa-se que é na classe de IE com maior potência (superior a 10 kW) que a proporção de IE com rácio Q/Qn “Insatisfatório” é inferior (cerca de 30%), existindo cerca de 70% de IE com rácio Q/Qn compreendido entre a classificação “Mediano” e “Bom”.

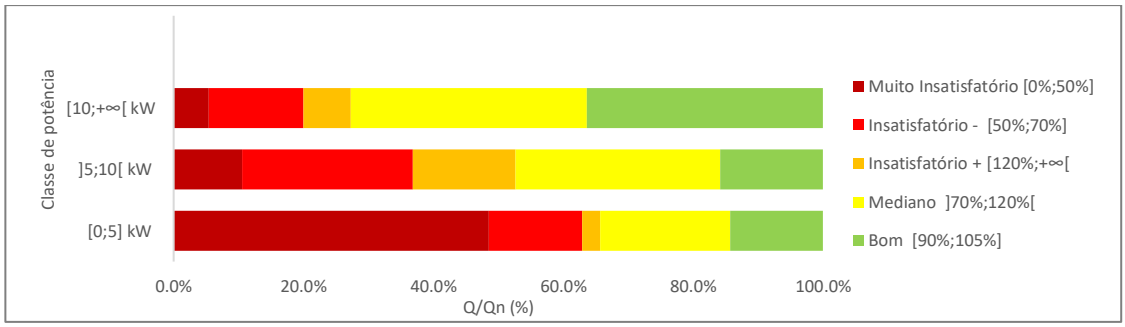


Figura 5.4 Distribuição das instalações elevatórias nos sistemas de abastecimento de água, por nível de desempenho de Q/Qn para cada intervalo de potência

Na Figura 5.5 verifica-se que 39% das IE apresentam um desempenho insatisfatório em termos do rácio Q/Qn: 18% com nível muito "Insatisfatório", 15% com nível "Insatisfatório –" e 6% com nível "Insatisfatório +". Com desempenhos positivos, nomeadamente "Mediano" 26% e "Bom" 24%. Parte dos dados não são fiáveis (11%), por isso não são considerados.

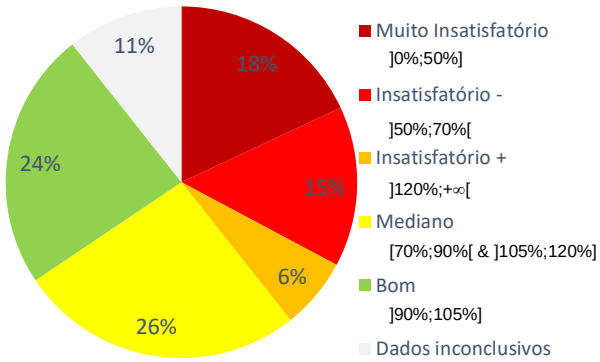


Figura 5.5 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo níveis de desempenho em termos de Q/Qn

Face aos resultados obtidos, as IE de menor potência podem estar sobredimensionadas, apresentar modos de funcionamento instáveis, resultando em baixas eficiências e numa maior possibilidade de degradação do rendimento ao longo do tempo. As IE de potência intermédia (5 a 10 kW) e as de potência mais elevada (maior que 10 kW) podem encontrar-se a funcionar mais próximas das condições para as quais foram dimensionadas, operam, em geral, para valores de caudal mais constantes e durante maiores períodos de tempo. Adicionalmente, dado serem equipamentos que exigem maior investimento e bombeiam volumes significativos para abastecimento de água podem também estar associados a um programa de manutenção periódica mais completo.

A evolução da variação do rendimento global relativamente ao rendimento ótimo (η'_0) em função do rácio Q/Qn é ilustrada na Figura 5.6. Com esta análise seria espectável encontrar uma tendência para a qual valores de caudal médio de operação mais próximos de Qn correspondem a rendimentos mais próximos do rendimento ótimo (assumindo que não existe degradação do rendimento). Apesar da dispersão de valores, verifica-se esta relação esperada na medida em que ao aproximar o valor de

caudal médio estimado do caudal nominal, a variação do rendimento relativamente ao ótimo tem tendência a diminuir. Verifica-se que alguns pontos apresentam um afastamento significativo face aos valores esperados. Aspetos como a degradação do rendimento ou erros na medição, recolha e processamento dos dados fornecidos podem contribuir para estes desvios.

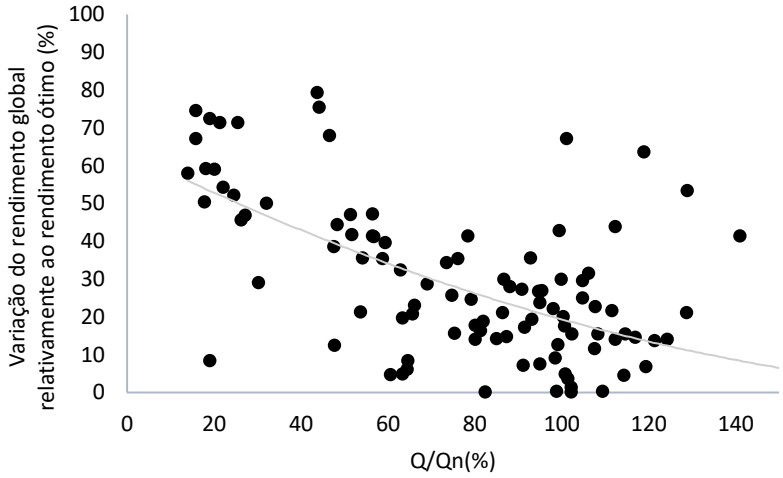
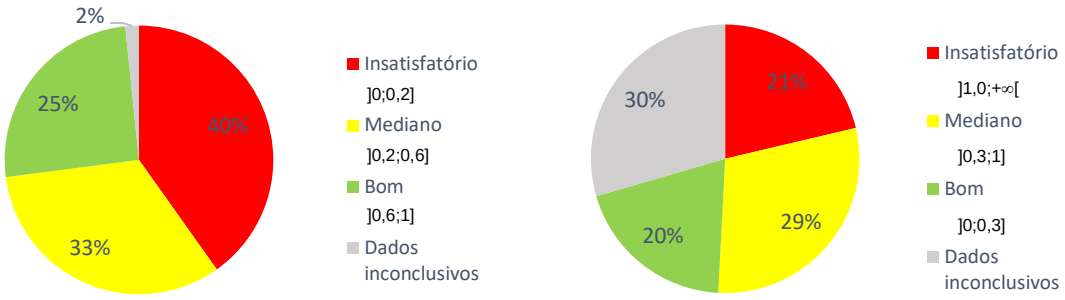


Figura 5.6 Variação do rendimento global relativamente ao rendimento ótimo com o rácio Q/Qn em instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água

A análise conjunta da idade e da degradação do rendimento das IE contribui para a avaliação da condição destes ativos. Apresenta-se na Figura 5.7 a distribuição do número de IE segundo os indicadores de desempenho, vida residual (a) e taxa de degradação anual (b), de instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água. A vida residual (VR) das IE (Figura 5.7 b), reparte-se da seguinte forma: 40% correspondem a IE com avaliação "insatisfatório", indicativo de equipamentos antigos; 33% das IE com avaliação "Mediano", indicativo de equipamentos a meio da vida útil; e apenas 25% da IE com avaliação "Bom" por corresponderem a IE novas. Devido a falta de informação ou a dados inconsistentes, não foram analisadas 2% da IE. A análise da taxa de degradação anual (D_a) é apresentada na Figura 5.7 b. Nesta análise, em grande parte das IE, os resultados ilustrados são inconclusivos (30%) visto que houve dificuldade na obtenção do rendimento esperado através da curva característica da bomba fornecida pelo fabricante. Verifica-se que 21% das IE operam com uma taxa de degradação anual do rendimento "Insatisfatório" (acima de 1% ao ano) em especial as IE mais recentes uma vez que ainda não atingiram o período de estabilização; 29% das IE operam com uma taxa de degradação anual "Mediano"; e 20% das IE têm uma taxa de degradação anual do rendimento classificada como "Bom".



a) b)

Figura 5.7 a) Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água segundo : a) vida residual das IE; b) taxa de degradação anual

O indicador que melhor relaciona a degradação nos equipamentos das IE é a idade. A Figura 5.8 mostra a evolução da taxa de degradação do rendimento com a idade, onde se verifica que existe uma clara tendência para maior degradação anual no inicio de vida das IE. Após os primeiros anos de vida, as IE tendem a estabilizar e a degradação diminui, umas vezes pela intervenção da entidade gestora, que com os primeiros anos de funcionamento identificou as fragilidades da IE podendo assim corrigi-las; por outro pela eventualidade da IE atingir uma degradação de tal forma significativa que a partir desse ponto não terá muita margem para se degradar mais, até que surja a situação de rotura do equipamento.

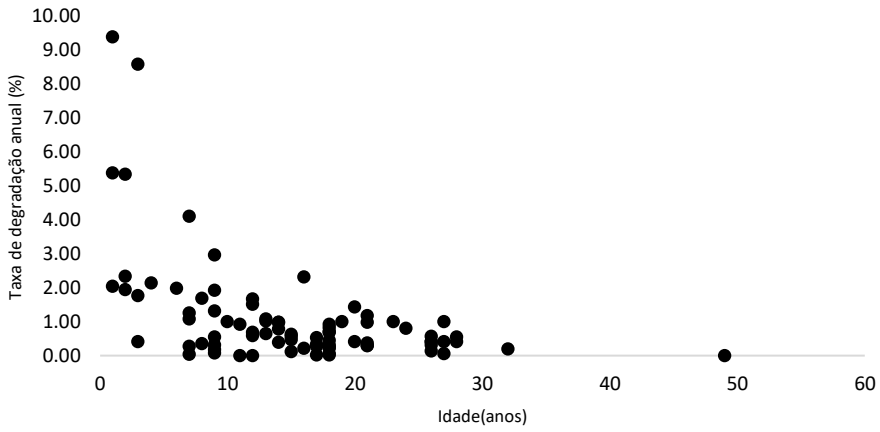


Figura 5.8 Evolução da taxa de degradação anual em função da idade das EE

No Quadro 5.1 apresenta-se a degradação média anual para diferentes intervalos de idade das IE. De notar que é também incluído o intervalo com IE superiores a 25 anos (correspondente ao fim da vida útil de acordo com o valor de referência definido no Quadro), visto algumas EG serem compostas por IE mais antigas. Assim, conclui-se que nos primeiros anos de vida das IE, a taxa de degradação anual é muito mais significativa.

Quadro 5.1 Média da taxa de degradação por intervalo de idade

Intervalos de idades(anos)	Média da taxa de degradação anual(%)
0 a 8	2,78
8 a 14	0,74
14 a 25	0,55
Maior do que 25	0,32

Efetua-se, nesta secção, a comparação entre marcas ou fabricantes com o objetivo de determinar as que melhor eficiência e garantias oferecem. Na Figura 5.9 é ilustrada a distribuição percentual da totalidade de fabricantes existentes para a soma dos três casos de estudo descritos no Capítulo 4 correspondentes a abastecimento de água. Por regra, existem três marcas que são preferencialmente escolhidas, nomeadamente M1 (72%), M2 (13%) e M4 (11%). São fabricantes de grande dimensão que oferecem facilidade de satisfação de qualquer requisito operacional, garantem qualidade de operação e disponibilidade no mercado nacional.

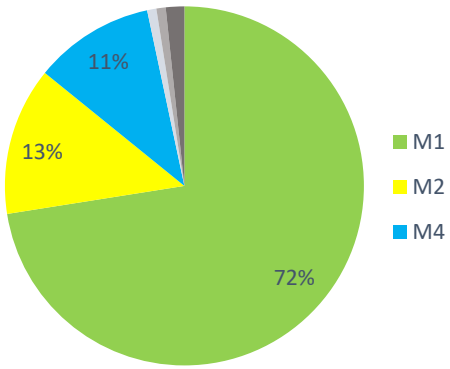


Figura 5.9 Distribuição de instalações elevatórias em sistemas de abastecimento de água por marca

Na Figura 5.10 é apresentada a mediana do rendimento global para as principais marcas presentes no abastecimento de água, divididas por intervalos de potência. As marcas M1 e M4 apresentam potências instaladas nos três intervalos de potência, sendo a M4 mais frequentemente instalada para potências superiores (maior que 10 kW). Conclui-se que, de um modo geral, a marca que apresenta melhor eficiência e provavelmente melhor dimensionamento, é a M4, seguindo-se a M1 e, por último, a M2. Sabendo que a marca M1 é a que apresenta o maior número de eletrobombas instaladas, o grau de confiança dos resultados acresce comparativamente com as outas marcas, permitindo desse modo conclusões mais fidedignas.

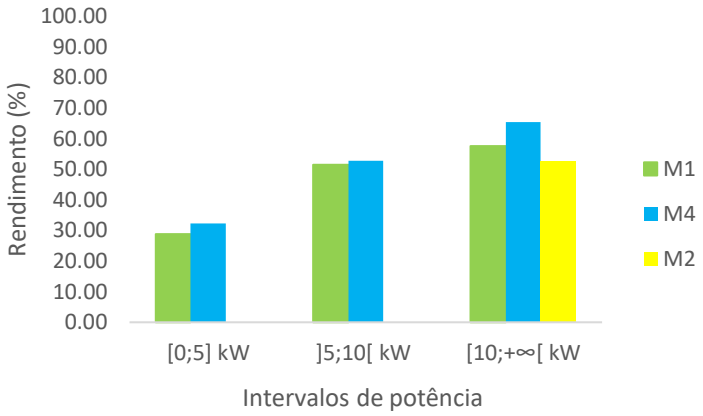


Figura 5.10 Mediana dos rendimentos estimados para as três principais marcas presentes na análise

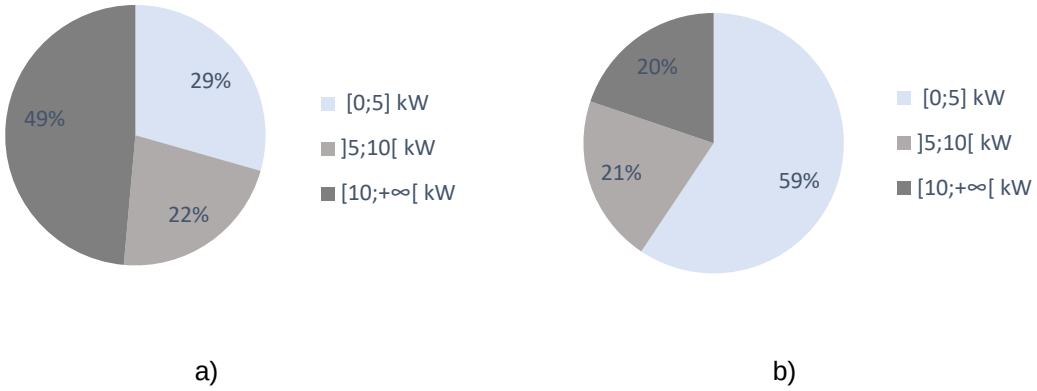
Na Figura 5.11 apresenta-se a mediana dos rendimentos global e ótimo para marcas com potências instaladas superiores a 10 kW, estas, são as que consomem mais energia e as que existem em maior número. A Figura 5.11 mostra que as IE em que os rendimentos globais e ótimo mais se aproximam é a M4, seguida da M1 e, por fim, a M2, a que apresenta a mediana do rendimento estimado mais longe do valor ótimo.

Figura 5.11 Mediana dos rendimentos estimado e ótimo para marcas com potências maiores que 10 kW

5.3 Análise global das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais

A amostra analisada é constituída por 99 instalações elevatórias de águas residuais. As bombas existentes nas IE analisadas são todas do tipo submersível centrífuga. Na Figura 5.12 é apresentada a distribuição de instalações elevatórias de abastecimento de água para cada intervalo de potência por: energia consumida (a) número de IE (b) . Verifica-se que 29% do consumo energético (Figura 5.12 a) está associado a potências abaixo de 5 kW. Seguem-se as IE com potências instaladas entre 5 e 10 kW, com um consumo energético equivalente a 22% (Figura 5.12 a). O maior consumo energético registado corresponde ao intervalo maior que 10 kW e equivale a 49% da energia total (Figura 5.12 a). Relativamente ao número de IE por intervalo de potência (Figura 5.12 b), verifica-se que para o intervalo 0 a 5 kW encontram-se 59% das IE, para o intervalo de 5 a 10 kW encontram-se 21% das IE e para o

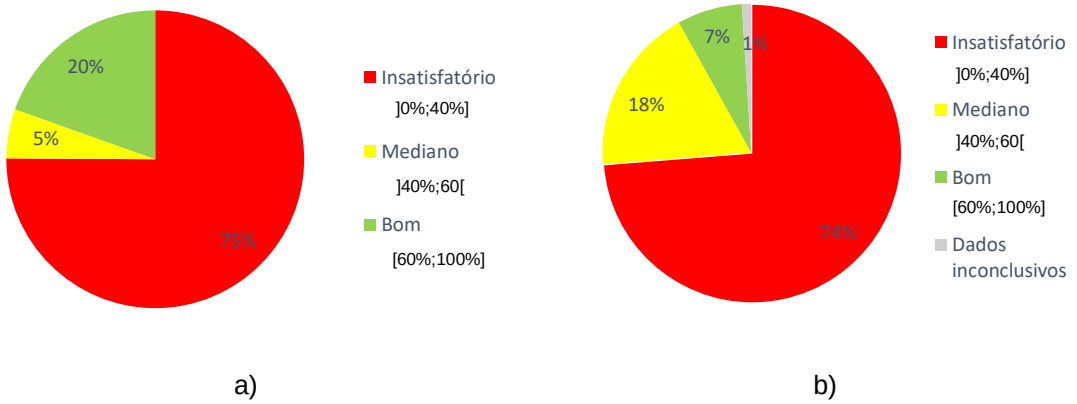
intervalo maior que 10 kW encontram-se 20% da totalidade das IE. Conclui-se que as IE que mais consomem são as com maior potência instalada, apesar de estarem em menor número.



a) b)

Figura 5.12 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de abastecimento de água por: a) consumo de energia por intervalo de potência b) Quantidade de IE por intervalo de potência

Na Figura 5.13 é apresentada a distribuição das instalações elevatórias de sistemas de drenagem de águas residuais segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética, para consumo energético (a) e por número de instalações elevatórias (b). O consumo de energia está distribuído da seguinte forma (Figura 5.13 a): com desempenho "insatisfatório", 75% do total, segue-se 20% do consumo que é realizado com desempenho "Bom", e 5% do consumo é classificado "Mediano". Relativamente ao numero de IE por cada nível de desempenho (Figura 5.13 b), verifica-se que 74% do total opera dentro do desempenho "insatisfatório", 18% das IE operam para nível "Mediano" e 7% operam para nível "Bom". Conclui-se que predomina uma a avaliação "insatisfatório" tanto no consumo total como no número de IE, o que indica que a necessidade de aplicar medidas de melhoria é elevada.



a) b)

Figura 5.13 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo níveis de desempenho em termos de eficiência energética para: a) consumo energético b) Quantidade de IE

Na Figura 5.14 é apresentado um gráfico ilustrativo da qualidade de operação e dimensionamento das IE, composto pela mediana dos valores referentes aos rendimentos estimado e ótimo das IE correspondentes a cada intervalo de potência. Estima-se que o intervalo de menor potência (0-5 kW) apresente uma elevada percentagem de erros na monitorização dos dados de operação das IE, dado

que em algumas ocasiões se verificam rendimentos estimados acima do ótimo, o que não é possível. Para outras duas classes de potência (5-10 e >10 kW), verifica-se um afastamento entre o rendimento estimado e o ótimo, em especial para os valores de potência instalada acima dos 10 kW, concluindo-se, por isso, qualidades de operação e de dimensionamento insatisfatórias.

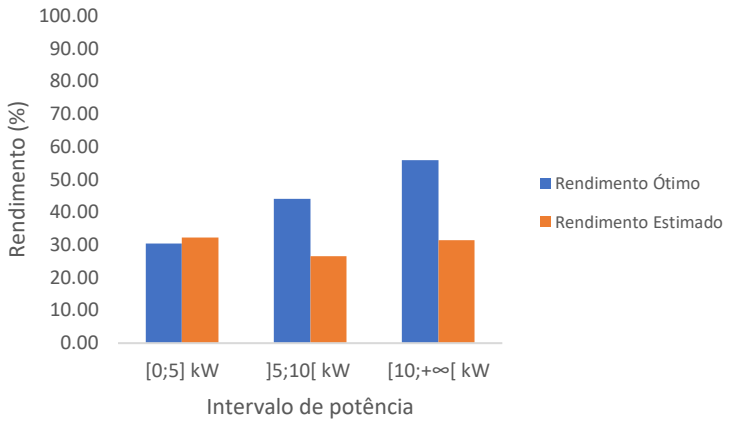


Figura 5.14 Variação do rendimento global e ótimo por classe de potência em IE de sistemas de águas residuais

Efetuou-se o estudo do rácio entre o caudal estimado e o nominal, Q/Qn, para analisar o desvio entre o caudal médio de operação e o caudal nominal de dimensionamento e poder identificar melhor que fatores influenciam a eficiência. Por essa razão, este indicador designa-se por ID complementar. A Figura 5.15 apresenta a avaliação deste indicador para as diferentes gamas de potência. A Figura 5.16 ilustra a avaliação do rácio Q/Qn para a totalidade das IE de sistemas de drenagem de águas residuais, em conformidade com os valores de referência definidos no Quadro 3.1.

A Figura 5.15 apresenta a distribuição da classificação Q/Q_n por intervalo de potência. As IE compostas por potências instaladas mais elevadas (maior que 10 kW) são as que predominantemente operam mais longe do caudal nominal, aproximadamente 71% opera para níveis de desempenho de Q/Qn "muito insatisfatório". Para o intervalo entre 5 e 10 kW, a classificação é muito negativa mais uma vez, 95% apresenta classificações: "muito insatisfatório", "insatisfatório – " e "insatisfatório +"). O intervalo entre 0 e 5 kW apresenta a maioria das IE (Figura 5.12 b) e os seus níveis de classificação são mais repartidos do que nos outros intervalos de potência, no entanto verifica-se mais uma vez predominância para classificações insatisfatórias("muito insatisfatório" cerca de 25%, "insatisfatório – cerca de 20%, "insatisfatório +" cerca de 20%) Em termos gerais, verifica-se que, o dimensionamento Q/Qn é insatisfatório, e que as IE de potência instalada mais elevada têm tendência a operar sobredimensionadas.

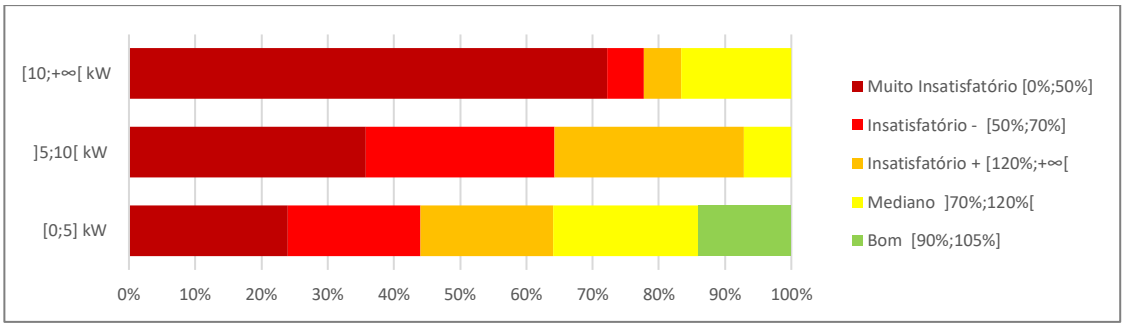


Figura 5.15 Distribuição das instalações elevatórias nos sistemas de águas residuais, por nível de desempenho de Q/Qn para cada intervalo de potência

Na Figura 5.16 verifica-se que 61% das IE apresentam níveis de Q/Qn insatisfatórios, dos quais 31% "muito insatisfatório", 15% "insatisfatório –" e 15% "insatisfatório +" . Existem 15% das IE com a classificação "mediano" e apenas 7% opera no nível "Bom". Parte das IE (17%) apresentam dados inconclusivos. Grande partes das IE opera em regiões da curva muito prejudiciais para o seu desempenho (c. de 50% das IE), é expectável que apresentem eficiências insatisfatórias e possível degradação.

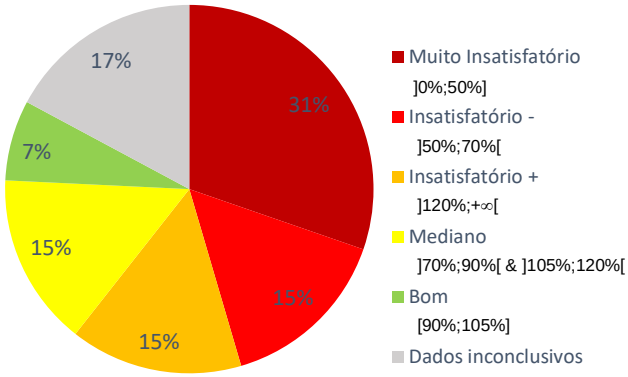
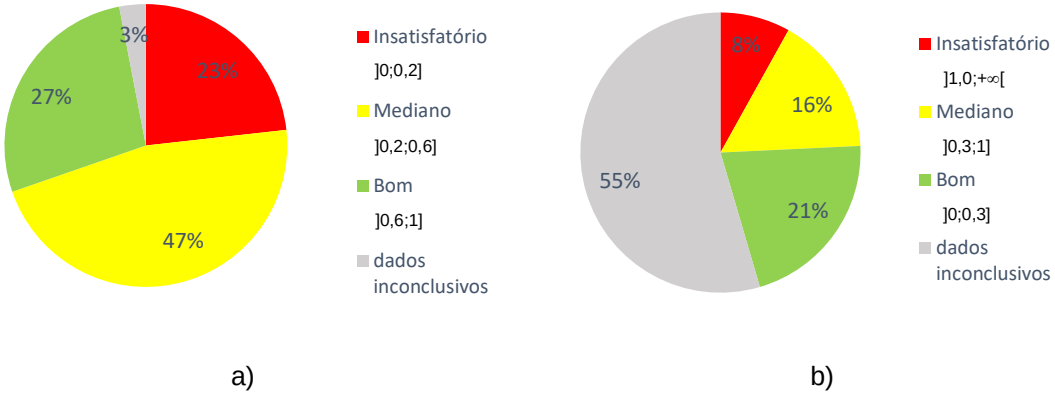


Figura 5.16 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo níveis de desempenho em termos de Q/Qn

A análise conjunta da idade e da degradação do rendimento das IE contribui para a avaliação da condição destes ativos. Apresenta-se na Figura 5.17 a distribuição do número de IE segundo os indicadores de desempenho, vida residual (a) e taxa de degradação anual (b), de instalações elevatórias de sistemas de águas residuais. A vida residual (VR) das IE presentes em AR (Figura 5.17 a) reparte-se da seguinte forma: correspondente ao nível "insatisfatório", 23%, ou seja IE antigas; a meio da vida útil, 47%, classificação "mediano"; com nível "bom" 27%, representam IE novas. Alguns erros e presença de dados menos fiáveis originaram a que 3% dos dados não fossem contabilizados. Sabendo que a maioria das IE apresentam VR entre o "mediano" e o "bom", seriam expectáveis eficiências melhores do que as que foram registadas na Figura 5.16. Conclui-se, deste modo, que o dimensionamento insatisfatório, a forte degradação nos primeiros anos de funcionamento ou a má monitorização de dados são as potenciais causas das más eficiências. A avaliação da taxa de degradação anual (D_a) é ilustrada na Figura 5.17 b. Verifica-se que a fiabilidade da informação fornecida

relativa aos catálogos, assim como pelos dados EG, não foi a exigida, apresentando-se algumas incertezas, e por isso por isso, 55% dos dados são considerados inconclusivos. Das IE analisadas, 8% apresentam taxas elevadas de degradação (classificação “insatisfatório”), 16% taxa de degradação anual de nível “mediano” e 21% apresenta valores de ligeira degradação (“classificação bom”).



a) b)

Figura 5.17 Distribuição das instalações elevatórias de sistemas de águas residuais segundo : a) vida residual das IE; b) taxa de degradação anual

Efetua-se a análise geral do desempenho associado às diferentes marcas encontradas em grupos de IE de sistemas de águas residuais. Apresentam-se apenas as marcas que surgem mais frequentemente na análise (M1, M2 e M3). Na Figura 5.18 é apresentada a distribuição percentual de marcas presentes na soma dos três casos de estudo. A maior representatividade é da marca ou fabricante M1 com 49%, segue-se a M2 (41%) e M3 (5%).

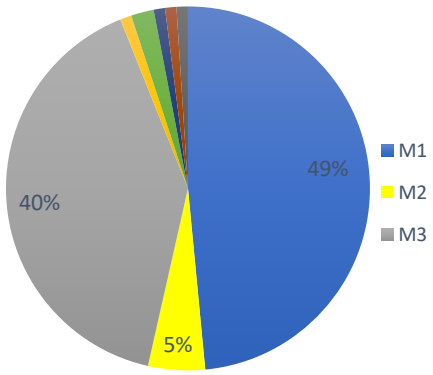


Figura 5.18 Distribuição de instalações elevatórias em sistemas de águas residuais por marca

As únicas marcas com representatividade suficiente para uma análise global são a M1 e a M3, visto que as duas somadas representam 89% do total dos equipamentos existentes em IE. Na Figura 5.19 apresenta-se a mediana dos rendimentos correspondentes às marcas M1 e M3 para as três classes de potência. Verifica-se que a marca M3 apresenta rendimentos globais ligeiramente superiores para os intervalos 0-5 kW e para maiores que 10 kW e, que para o intervalo intermédio (5 a 10 kW), as marcas são muito semelhantes, não havendo por isso uma opção de eleição.

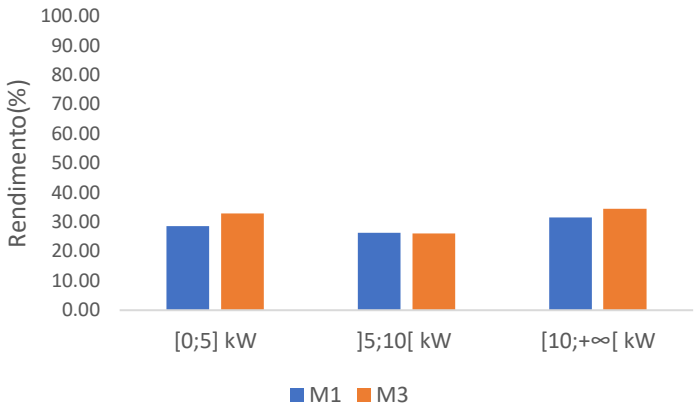


Figura 5.19 Mediana dos rendimentos globais correspondentes às marcas M1 e M3 por intervalo de potência.

Atendendo a que os dados apresentam alguns erros no intervalo de 0-5 kW e que os valores de rendimento global são muito semelhantes nas duas marcas (M1 e M3) para potências entre 5-10 kW, efetua-se uma análise comparativa entre o rendimento global e o ótimo apenas para o intervalo correspondente às maiores potências (>10 kW). Na Figura 5.20 apresenta-se a mediana do rendimento ótimo e global para cada uma das duas marcas. Verifica-se que, apesar do rendimento global para M3 ser superior, o seu desempenho está longe do esperado, quer por razões de dimensionamento quer por degradação do equipamento. Verifica-se, também, que os rendimentos ótimos são em geral insatisfatórios para M1; deste modo não serão espectáveis rendimentos globais acima de 40% (medianos ou bons), mesmo que as IE trabalhem no seu ponto de melhor eficiência.

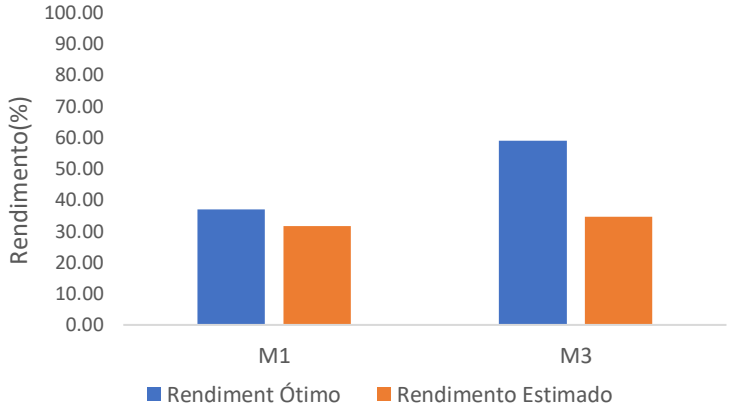


Figura 5.20 Mediana do rendimento global e ótimo para as marcas M1 e M3 no intervalo de potência maior que 10 kW

5.4 Síntese de resultados

Para o abastecimento de água verifica-se que os sistemas são maioritariamente compostos por instalações elevatórias de potências instaladas superiores a 10 kW (Figura 5.1 b), os consumos energéticos são mais elevados para esse intervalo (Figura 5.1 a). A avaliação da eficiência energética (Figura 5.2 b) é favorável para grande parte das IE, 50% são classificadas com desempenho “mediano”.

A o consumo caracteriza-se por níveis de eficiência “mediano”, 74%, o que indica que a nível geral o desempenho é aceitável, no entanto, a classificação “bom” é a que menos vezes se verificou, por isso conclui-se que existe ainda um potencial de redução de gastos energéticos muito elevado (Figura 5.2 a). O indicador Q/Qn demonstrou grande utilidade na análise, visto que reforçou a evidência de que a IE com potências instaladas mais elevadas, estarem assocadas a melhores eficiências, na medida em que se verificou que o caudal destas se encontra geralmente mais próximo do caudal nominal, e vice-versa para as IE de potência instalada mais baixa, em que se concluiu que uma parte está sobredimensionada (Figura 5.3). Existe ainda uma percentagem elevada de IE a operar no fim de vida útil (Figura 5.7). A marca predominante é a M1 (Figura 5.9) e a que melhor desempenho apresentou foi a M4 (Figura 5.10). Os dados de um modo geral foram fidedignos.

Relativamente aos sistemas de drenagem de águas residuais, ao contrário do que se passa no abastecimento, verifica-se predominância nas IE com potências instaladas mais baixas, menores que 5 kW (Figura 5.12 b). A maioria do consumo energético recai nas IE de maior potência, maiores que 10 kW (Figura 5.12 a). A maioria do consumo energético verificado, é associado a IE que operam para níveis de desempenho da eficiência “insatisfatório” (Figura 5.13 a). A classificação mais vezes atribuída para o desempenho de eficiência das IE é o “insatisfatório” (Figura 5.13 b). O dimensionamento de Q/Qn é muito ilustrativo do mau desempenho das IE, que operam em grande parte do seu funcionamento longe do caudal nominal. Conclui-se por isso que existe uma grande necessidade de melhoria ao nível da redução de perdas de energia. A análise foi marcada pela pouca fiabilidade dos dados fornecidos. Verifica-se ainda que a marca predominante é mais uma vez a M1 (Figura 5.18) e a que apresenta eficiência mais elevada é a M3 (Figura 5.19).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Principais conclusões do trabalho

Nos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais, é fundamental garantir adequados níveis de eficiência das IE por forma a reduzir os consumos energéticos e os custos associados, bem como garantir o bom desempenho dos equipamentos que funcionam durante toda a sua vida útil. Nesta perspetiva, torna-se crucial desenvolver metodologias para realizar o diagnostico e avaliar o desempenho das IE.

A metodologia desenvolvida no âmbito deste estudo corresponde ao objetivo de diagnosticar e avaliar o desempenho das IE, recorrendo a três categorias de indicadores de desempenho (ID): i) indicadores de eficiência; ii) indicadores complementares; iii) indicadores de consumo. A metodologia é aplicada a um conjunto de IE de três entidades gestoras, correspondente a uma amostra com 221 IE. Os resultados da análise permitiram concluir que a metodologia proposta permitiu realizar um diagnóstico do funcionamento das IE sem recorrer a auditorias energéticas. Foram identificadas as IE com maiores ineficiências, foram analisadas e comparadas medidas destinadas à introdução de melhorias.

A seguir, descrever os principais resultados da aplicação da metodologia aos três casos estudo. Salientar as principais diferenças entre os três casos em termos de eficiência e de medidas de melhoria propostas. Verificou-se que a primeira categoria – os indicadores de eficiência são os mais importantes, na medida em que permitem identificar, através de cálculos simples, quais as IE mais ineficientes, e quais as que requerem a primeira prioridade de uma avaliação mais detalhada que permita identificar os problemas específicos que apresentam, e as medidas a introduzir para os superar. Os indicadores complementares mostraram ser igualmente de grande utilidade, salientando-se: o rácio entre o caudal estimado e o caudal nominal, a variação do rendimento global relativamente ao rendimento ótimo, a vida residual, a degradação anual e o tempo anual de funcionamento. A avaliação da variação de eficiência em relação ao afastamento entre caudal de operação e o nominal mostrou ser o indicador complementar mais relevante. Finalmente, os indicadores de consumo, como sejam a poupança anual e o peso do custo energético, revelaram ser úteis para determinar o potencial de poupança energética e a relação entre o peso do custo inicial e o custo energético.

Os dados sobre os quais o estudo foi realizado abrangem apenas num ano de atividade, o que não permitiu aprofundar o estudo da evolução da degradação do rendimento ao longo do tempo.

O estudo permitiu ainda identificar os principais fatores que influenciam a eficiência energética. Verificou-se que os dados de IE de sistemas de abastecimento de água apresentavam uma consistência muito superior em relação aos de drenagem de águas residuais, com menos falhas e incertezas associadas, com melhor registo de dados de operação, o que facilitou a respetiva análise. As IE de sistemas de abastecimento de água também apresentavam períodos de funcionamento mais estabilizados, grupos de bombeamento mais eficientes e manutenção mais regular. As IE de águas residuais tinham, em geral, equipamentos a operar muito longe do seu ponto ótimo e estavam

tipicamente sobredimensionadas; também se detetou pouca fiabilidade nos dados relativos aos sistemas de AR, em particular, para as IE com menores potências instaladas. Pode concluir-se que globalmente, as IE de maior potência estão, em geral, melhor dimensionadas (i.e., o caudal de operação está próximo do caudal nominal), têm melhor eficiência e maior vida útil, mas são também as que mais energia consomem.

Alguns dos resultados obtidos foram estimados com base em formulações aproximadas, trabalhando-se entre níveis de tolerância aceitáveis para fazer face a imprecisões e para ter em conta eventuais erros de reporte ou processamento de dados de monitorização, sem que a margem de erro afetasse o resultado da análise. No entanto estes procedimentos não foram suficientes para avaliar, por exemplo, IE que apresentem níveis de degradação elevados, uma vez que estas já não funcionam com as mesmas curvas características fornecidas pelo fabricante. A única forma de avaliar o seu funcionamento seria a realização de auditorias energéticas *in situ* para determinar as novas curvas de operação. Outras situações em que se considerou inapropriado efetuar qualquer análise foram as que conduziam resultados irreais. Para estas situações recomenda-se uma nova recolha de dados, ou procedimentos que assegurem melhoramento da monitorização e processamento dos dados

As principais causas da perda de eficiência das bombas centrífugas utilizadas em sistemas de abastecimento e de drenagem são: i) deficiências na instalação do grupo eletrobomba e/ou do respetivo circuito hidráulico; ii) condições de operação inadequadas; iii) ausência de manutenção regular.

6.2 Recomendações para as entidades gestoras

Recomenda-se às entidades gestoras: uma otimização da monitorização do funcionamento das IE, em particular no caso das AR, visto que grande parte da análise do desempenho pode ser feita à distância sendo por isso necessária a melhor fiabilidade possível dos dados.

É também recomendável o desenvolvimento e implementação de planos de manutenção dos grupos de bombeamento e de outros equipamentos dos sistemas urbanos de água, pois evita situações de emergência e a necessidade de efetuar reparações com custos acrescidos. Recorrendo a inspeções de manutenção periódicas e devidamente planeadas, pode-se realizar a aferição da qualidade do trabalho efetuado bem como o acompanhamento da evolução do ciclo de degradação do rendimento.

Sempre que se substituam ou reabilitem equipamentos existentes ou se instalem novos grupos convém ter em consideração, não só os custos de aquisição, operação e manutenção, mas também a capacidade e disponibilidade técnica presente no mercado, de modo a garantir que os equipamentos são reparados com prazos, custos e qualidade adequados.

6.3 Recomendações de trabalhos futuros

Na sequência do presente trabalho, recomenda-se a realização dos seguintes estudos de investigação futuros:

- Análise estatística multivariada dos fatores que influenciam a eficiência das IE para um conjunto mais alargado de equipamentos.
- Análise mais aprofundada do circuito hidráulico atendendo às suas características (e.g., material e diâmetro) e configuração.
- Implementar uma ferramenta com a metodologia desenvolvida que permita uma avaliação global da eficiência do sistema, por exemplo através do cálculo do balanço energético e a avaliação da eficiência das IE, com identificação das prioritárias e aquelas em que qualidade dos dados deve ser melhorada.
- Seleção e recolha dos dados de cada instalação elevatória relativa a diferentes períodos do ano, de modo a efetuar um diagnóstico sazonal e compreender as necessidades reais do sistema.
- Análise hidráulica do efeito da substituição de algumas sobrepressoras por um bypass e verificação se os requisitos de pressão a jusante continuam a ser cumpridos.
- Estudo de soluções de bombeamento alimentadas por energia solar.
- Desenvolvimento de uma metodologia que permita justificar a instalação de variador de velocidade para diferentes instalações elevatórias

Deixam-se, também, algumas questões em aberto:

- Será possível para um futuro próximo garantir que se efetua a transição da energia consumida pelas IE para energia 100% limpa?
- Será possível construir sistemas elevatórios autossuficientes alimentados apenas por energia solar recorrendo a um sistema baterias para o armazenamento desta energia?

7 BIBLIOGRAFIA

ADVANTECH. (2020). Real-time Pump Station Monitoring in Indonesia's Water Supply Industry. Energy and Environment. https://www.advantech.com/resources/case-study/real-time-pump-station-monitoring-in-indonesia's-water-supply-industry (consultado em 10/12/2020)

Alegre, H., e Covas. D. (2010*). Gestão patrimonial de Infraestruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação. Série Guias Técnicos n.º 16, ERSAR, LNEC, IST, Lisboa, 472 pp. (ISBN: 978-989-8360-04-5)* http://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias

Aleixo, N. (2013). *LCC – Custo do Ciclo de Vida Útil de uma Bomba*. Artigos Técnicos, KSB. https://www.ksb.com/ksb-pt/Informacoes_tecnicas-noticias_ch/Arquivo/2013-info-tecnicas-e-noticias/lcc-custo-do-ciclo-de-vida-util-de-uma-bomba-/177614/ (consultado em 15/12/2020).

Budris, A. R. (2016). *Centrifugal Pump Flow Operating Regions and Impact on Reliability*. Water World, set.2016. https://img.waterworld.com/files/base/ebm/ww/image/2016/09/1609wwpmp_z03.png?auto=format&fit=crop&h=720&w=1280. (consultado em 9/12/2020).

Carvalho, L.C. (2019). *Bombeamento de Fluidos.* Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de Lorena. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4583896/mod_resource/content/0/Bombas_Apostila_rev_Liv02.pdf (consultado em 29/12/2020).

Chaurette, J. (2011). *Guidelines For Pump System Designers*. Plant Engineering. Illinois. https://www.pumpfundamentals.com/download-free/guideline_pump_system.pdf. (consultado em 9/12/2020)

Covas, D., Cabral, M., Pinheiro, A., Marchionni, V., Antunes, S., Lopes, N., Mamouros, L., e Brôco, N. (2018). *Custos de Construção de Infraestruturas do Ciclo Urbano da Água. Série Guias Técnicos n.º 23, ERSAR, IST. (ISBN: 978-972-98996-4-5).*http://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias

Cunha, L.V. (2002) *Perspectivas da Gestão da Água para o Século XXI: Desafios e Oportunidades.* Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, Portugal. Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 7 n.4 Out/Dez 2002, 65-73. https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/101/0ec799def2a8f8f24fd11a84591f0438_f644608713ad675f5047d3dd6b069079.pdf (consultado em 6/12/2020)

Elsey, J. (2019). Why is pump operating off the curve? Pumps&Systems. https://www.pumpsandsystems.com/why-your-pump-operating-curve (consultado em 29/12/2020).

ERSAR. (2020). Caracterização do setor. http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao (consultado em 29/12/2020).

Evans, J., (2011). Why the Left Can Be Dangerous. Pumps&Systems, dec.2011.https://www.pumpsandsystems.com/why-left-can-be-dangerous (consultado em 25/8/2020).

Ferman, R. (2015). What is the purpose of minimum flow?. Pump Industry, dec.2015. https://www.pumpindustry.com.au/what-is-the-purpose-of-minimum-flow (consultado em 25/8/2020).

Foray, J. (2014). Energy Efficiency Considerations in Pumps and Pump Stations. Kennedy/Jenks, mar.2014. http://www.energy.wsu.edu/LinkClick.aspx?fileticket=t3ubiA8D8A4%3D&tabid=692&mid=1345. (consultado em 25/12/2020).

Franklin, E. (2016). Obtenção Da Curva Característica De Uma Bomba Centrifuga. Laboratório de calor e fluidos II. FEM/UNICAMP. http://www.fem.unicamp.br/~franklin/EM886/Exp6_bomba_centrif.pdf. (consultado em 25/12/2020).

Freire, C. (2015). Custo do Ciclo de Vida em Sistemas de Bombeamento. Paço de Arcos: Grundfos. http://www.cotr.pt/docs/ICNRD/Papers/61.pdf. (consultado em 25/12/2020).

Grundfos. (2019). Enclosure Class. 2019. https://www.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/enclosure-class.html. (consultado em 25/12/2020).

Grundfos. (2020). CR 90-2 A-F-A-E-HQQE - 96124077. 2020. https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&lang=PTG&productnumber=96124077&qcid=1132382427. (consultado em 25/12/2020).

Grundfos. (s/d). Gama De Bombas. https://product-selection.grundfos.com/pt/products?tab=all (consultado em 25/12/2020).

Gutai, S. (2015). How to Read Pump and System Curves. AQUA magazine, jan.2015. https://aquamagazine.com/service/how-to-read-pump-system-curves.html (consultado em 25/12/2020).

Guyer, J. P. (2012). Introduction to Pumping Stations for Water Supply Systems.CED engineering. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GUYER%202012%20Introduction%20to%20Pumping%20Stations%20for%20Water%20Supply%20Systems.pdf (consultado em 25/12/2020).

Heinz, P. B. e Budris, A. R. (2015). Pump Users Handbook. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004.

Hydraulic Institute. (2017). Throttling Valves & Pump Corrosion Issues. Pumps&Systems, dec.2017. https://www.pumpsandsystems.com/pumps/throttling-valves-pump-corrosion-issues (consultado em 25/12/2020).

Jennings, B. (2013). Some Effects of Operating Pumps Away from Best Efficiency Point. Hydro inc, feb.2013. https://empoweringpumps.com/some-effects-of-operating-pumps-away-from-best-efficiency-point/ (consultado em 15/11/2020)

KSB. (2016). Segredos da Manutenção: Intermutabilidade de peças. Info Técnicas e Notícias. https://www.ksb.com/ksb-pt/Informacoes_tecnicas-noticias_ch/Arquivo/2016-info-tecnicas-e-noticías/segredos-da-manutenção-intermutabilidade-de-peças-/1180800/. (consultado em 15/12/2020)

KSB. (2020). Pump efficiency. Centrifugal Pump Lexicon. https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/pump-efficiency/191090/ (consultado em 15/11/2020)

KSB.(2016). Characteristic Curves Booklet. https://www.ksb.com/blob/1475410/fed4f9f49a99458982adc9788c4ca2dc/curve-etanorm-data.pdf (consultado em 15/11/2020)

Lax, R. (2014). Optimize Centrifugal Pump System Efficiency. ITT PRO Services, and Mike Pemberton. https://www.chemicalprocessing.com/articles/2014/optimize-centrifugal-pump-system-efficiency-/. (consultado em 15/12/2020)

Leite, P., Vivas, E., Valente, L., Ferreira, F., Costa, J. R., e Teixeira, M. (2018). Avaliação de Desempenho de Grupos Eletrobomba Através da Realização de Testes de Eficiência. Porto: Noraqua. https://noraqua.pt/publicacoes/12-congr-agua-1.pdf

Michael Smith Engineers. (2020). Useful information on NPSH. https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/npsh (consultado em 15/12/2020).

Monachesi, M., G. (2005). Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Eletrobrás e Procel, Rio de Janeiro. https://www.researchgate.net/publication/336584768_LEVANTAMENTO_EXPERIMENTAL_DA_ASSOCIACAO_EM_SERIE_DE_BOMBAS_CENTRIFUGAS_COM_POTENCIA_DE_12_CV/figures?lo=1 (consultado em 15/12/2020).

Projetap. (2018). Bombas Hidráulicas. https://projetap.com.br/confraria/titulo/ (consultado em 15/12/2020).

Quintela, A. C. (1981). Hidráulica. Editado por Fundação Caloust Gulbenkian. 6th ed. Lisbon.

Rodrigues, E. (2015). Estratégias para Eficiência Energética em Estações Elevatórias de Águas Residuais. Porto: FEUP, fev.2016. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiwieTjgrvtAhWR2hQKHfoIDX4QFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fsigarra.up.pt%2Ffep%2Fpt%2Fpub_geral.show_file%3Fpi_doc_id%3D41002&usg=AOvVaw1uglimM898BNGB9FZyHeGz (consultado em 15/12/2020)

Saldanha Matos, J. (2003). Ambiente e Saneamento Sistemas de Drenagem Urbana. Editado por IST Press. Lisboa.

Santos, A., Oliveira, F., Soares, G., Carneiro, J., Lima, L., Viegas, M., Corigo, P., Nogueira, P., Cardoso, P. e Quaresma, P. (2018). Uso Eficiente de Energia nos Serviços de Águas. Série Guias Técnicos nº 24. Lisboa. ERSAR. http://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias

Sousa, E. R. (2001). Sistemas de Distribuição de Água. Lisboa: Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico.

Stoffel, B. (2015). Assessing the Energy Efficiency of Pumps and Pump Units: Background and Methodology. Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2014-0-04677-1.

Strand, M. (2020). Selecting the Right Wastewater Pump for Your Lift Station. Pumps&Systems, feb.2020. https://www.pumpsandsystems.com/selecting-right-wastewater-pump-your-lift-station.

8 ANEXOS

8.1 Anexo A

Quadro 8.1 Dados utilizados para análise de desempenho das IE para a EG-A, EG-B e EG-C

	Instalação Elevatória (-)	Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG -A	1	12,64	S	13,00	Grundfos	56,66	68,75	100,62	0,48	33,31	0,65	Mediano	Mediano	Bom	Mediano	17,58	1997,65	M	68352,00
	2,1	8,40	S	7,00	Grundfos	23,77	52,00	22,01	0,72	20,30	0,03	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	54,28	932,34	OP1	10335,00
	2,2	4,44	S	15,00	Grundfos	18,59	65,00	21,28	0,40	21,80	0,56	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	71,40	1423,59	INF2	11997,00
	2,3	3,41	N	49,00	Grundfos	66,14	65,00	82,29	0,00	7,50	0,00	Mediano	dados inconclusivos	Mediano	Insatisfatório	0,00	0,00	OP3	7510,00
	3	18,90	S	20,00	Grundfos	20,26	55,70	118,83	0,20	31,72	1,44	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório	63,63	5754,69	INF2	54414,00
	4	12,20	S	21,00	Grundfos	51,43	64,03	63,31	0,16	26,50	0,29	Mediano	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	19,69	893,79	OP1	27313,00
	5,1	16,00	N	32,00	KSB	66,76	78,20	87,27	0,00	17,47	0,20	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	14,63	3702,02	INF2	152220,00
	5,2	14,44	S	21,00	Grundfos	57,39	65,50	47,66	0,16	20,00	-0,57	Mediano	dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	12,39	391,72	OP3	19030,00
EG-B	1	6,18	N	24,00	Grundfos	47,87	68,00	104,73	0,04	3,74	0,81	Insatisfatório	Mediano	Bom	Insatisfatório	29,60	1823,65	INF2	39881,75
	2,1	6,18	N	15,00	Grundfos	57,27	61,00	64,43	0,40	5,15	-0,08	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Mediano	6,12	293,73	OP2	31071,93
	2,2	12,09	N	7,00	Lowara	60,04	66,00	98,38	0,72	2,58	0,28	Mediano	Bom	Bom	Bom	9,03	525,99	M	37714,42
	2,3	16,30	S	1,00	Grundfos	63,02	73,00	121,21	0,96	5,05	5,38	Mediano	Insatisfatório	Insatisfatório +	Bom	13,67	2192,74	OP1	103818,37
	3,1	2,20	S	9,00	Lowara	13,24	52,00	15,73	0,64	3,88	1,31	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	74,54	691,18	OP1	6001,90
	3,2	6,32	S	21,00	Grundfos	30,50	56,00	26,14	0,16	5,85	-0,21	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	45,54	1170,56	OP5	16637,37
	3,3	3,33	S	3,00	Grundfos	14,27	58,00	44,09	0,88	2,78	8,58	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	75,39	1223,21	INF2	10501,85
	4,1	6,11	N	17,00	Grundfos	37,39	58,00	54,11	0,32	2,47	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Insatisfatório	35,54	601,04	INF2	10946,78
	4,2	6,11	S	18,00	Grundfos	16,25	59,00	19,01	0,28	2,86	0,21	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	72,46	836,77	INF2	7474,03
	4,3	16,67	N	21,00	Grundfos	54,09	64,00	102,19	0,16	4,25	0,38	Mediano	Mediano	Bom	Insatisfatório	15,48	2517,06	INF2	105228,46
	4,4	3,33	s	3,00	Grundfos	26,78	56,00	24,52	0,88	6,43	0,41	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Bom	52,19	883,78	INF2	10960,97
	5,1	12,06	N	14,00	Grundfos	47,53	66,00	88,04	0,44	4,47	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Mediano	Mediano	27,98	2344,97	OP2	54247,52
	5,2	16,30	N	17,00	Grundfos	62,91	72,00	99,07	0,32	3,26	0,53	Mediano	Mediano	Bom	Insatisfatório	12,63	1528,29	INF2	78324,11
	5,3	19,89	N	17,00	Grundfos	53,27	68,00	111,53	0,32	4,60	0,34	Mediano	Mediano	Mediano	Insatisfatório	21,66	5080,63	INF2	151797,80
	8,1	4,65	N	13,00	Grundfos	28,74	51,10	112,26	0,48	0,29	1,02	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Mediano	43,75	219,40	INF2	3245,83
	8,2	24,44	N	19,00	Grundfos	47,18	73,00	75,97	0,24	1,03	0,99	Insatisfatório	Mediano	Mediano	Insatisfatório	35,37	1938,43	INF2	35471,83
	8,3	12,09	S	14,00	Grundfos	49,04	69,00	30,16	0,44	3,97	-0,86	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	28,93	841,78	OP5	18833,69
	8,4	4,44	S	7,00	Lowara	26,22	64,00	19,98	0,72	11,57	1,25	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	59,03	2056,73	INF2	22552,32
	9,1	3,45	N	3,00	Grundfos	48,72	57,00	116,84	0,88	3,65	1,76	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Bom	14,52	406,85	OP1	18136,32
	9,2	3,33	N	21,00	Grundfos	54,05	64,00	75,23	0,16	1,62	0,28	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	15,55	193,32	OP1	8047,14
	9,3	1,67	S	9,00	Lowara	22,28	53,00	13,92	0,64	7,95	0,30	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	57,97	735,41	INF2	8211,60
	10,1	6,15	N	16,00	Grundfos	39,26	67,00	78,32	0,36	2,44	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Mediano	Insatisfatório	41,41	1446,19	OP2	22604,18
	10,2	1,83	S	17,00	Grundfos	19,64	48,10	18,06	0,32	9,70	0,02	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	59,18	725,02	INF2	7930,02
	10,3	3,33	S	16,00	Grundfos	19,05	58,00	101,07	0,36	0,59	2,31	Insatisfatório	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório	67,15	696,99	INF2	6718,12
	11,1	16,30	N	1,00	Grundfos	57,61	73,00	128,71	0,96	3,00	9,39	Mediano	Insatisfatório	Insatisfatório +	Bom	21,09	2610,92	OP1	80136,57
	11,2	55,72	S	9,00	Efaflu	64,37	69,00	119,24	0,64	0,12	0,07	Mediano	Bom	Mediano	Bom	6,71	65,78	M	6349,55
	11,3	8,15	N	9,00	Grundfos	32,66	70,00	128,78	0,64	0,15	1,93	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório +	Bom	53,34	309,24	INF2	3752,21
	12,1	12,04	S	1,00	Grundfos	63,75	67,00	100,72	0,96	5,91	2,05	Mediano	Insatisfatório	Bom	Bom	4,85	581,57	M	77663,37
	12,2	12,09	N	2,00	Grundfos	58,34	66,00	107,53	0,92	4,98	2,33	Mediano	Insatisfatório	Mediano	Bom	11,61	1472,31	M	82086,70
	12,3	16,30	S	12,00	Grundfos	50,02	73,00	106,05	0,52	5,08	1,66	Mediano	Insatisfatório	Mediano	Mediano	31,48	4388,19	INF2	90236,72
	12,4	8,33	N	16,00	Grundfos	58,47	68,00	112,23	0,36	1,87	0,22	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	14,02	667,76	INF2	30823,94
	12,5	1,26	S	9,00	Grundfos	26,03	52,00	32,04	0,64	5,53	0,55	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Bom	49,95	233,64	INF2	3027,44
	12,6	1,78	S	12,00	Grundfos	14,29	50,00	25,42	0,52	4,99	0,68	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	71,43	385,93	INF2	3497,20
	12,7	2,44	S	15,00	Grundfos	18,39	56,00	15,78	0,40	11,90	0,11	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Mediano	67,16	1678,12	INF2	16173,41
	13,1	4,44	S	18,00	Grundfos	28,79	54,20	27,12	0,28	11,86	0,01	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	46,88	2149,11	INF2	29670,38
	13,2	1,79	S	9,00	Grundfos	10,34	50,00	43,68	0,64	0,94	2,96	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	79,33	339,11	INF2	2766,80
	13,3	2,44	S	21,00	Grundfos	18,24	57,00	46,61	0,16	1,39	1,18	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	67,99	375,64	INF2	3575,89

Quadro 8.1 Dados utilizados para análise de desempenho das IE para a EG-A, EG-B e EG-C (*continuação*)

	Instalação Elevatória (-)	Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG-C	1,1	1,22	S	14,00	Grundfos	22,63	45,60	17,73	0,44	5,30	-0,37	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	50,38	125,09	OP3	1881,00
	1,2	1,10	S	8,00	Lowara	46,59	64,00	90,70	0,68	2,69	1,68	Insatisfatório	Insatisfatório	Bom	Bom	27,20	92,32	INF2	2571,00
	1,3	8,43	S	15,00	Grundfos	74,56	68,00	102,05	0,40	1,30	-0,64	Bom	Dados inconclusivos	Bom	Mediano	-9,65	-56,77	OP3	4455,00
	1,4	20,56	S	14,00	Grundfos	54,24	73,00	74,61	0,44	1,75	0,98	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	25,69	606,70	OP1	17889,00
	1,5	26,94	S	26,00	Grundfos	56,76	72,00	53,64	0,00	3,10	0,12	Mediano	Bom	Insatisfatório -	Insatisfatório	21,17	852,94	OP1	30530,00
	1,6	35,29	S	14,00	Grundfos	57,47	67,00	84,95	0,44	10,58	0,40	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	14,23	2598,05	OP1	138309,00
	1,7	8,82	S	2,00	Lowara	47,32	60,00	86,37	0,92	10,46	5,34	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Bom	21,14	845,97	INF2	30317,00
	2,1	22,00	N	18,00	KSB	39,41	60,00	73,38	0,28	4,00	0,70	Insatisfatório	Mediano	Mediano	Insatisfatório	34,32	2615,53	INF2	57727,00
	2,2	15,00	N	18,00	KSB	48,40	66,00	94,54	0,28	7,00	0,92	Insatisfatório	Mediano	Bom	Insatisfatório	26,67	2548,22	INF2	72385,00
	2,3	37,00	N	18,00	KSB	52,74	70,00	79,05	0,28	4,00	0,68	Mediano	Mediano	Mediano	Insatisfatório	24,65	3023,67	OP1	92922,00
	2,4	7,50	S	18,00	KSB	58,63	70,00	81,27	0,28	6,65	0,24	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	16,24	320,34	OP1	14947,00
	2,5	12,09	N	18,00	Grundfos	66,89	70,00	114,19	0,28	2,50	0,06	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	4,45	105,30	OP1	17939,00
	2,6	10,28	S	18,00	KSB	47,66	68,00	99,74	0,28	2,00	0,82	Insatisfatório	Mediano	Bom	Insatisfatório	29,92	357,49	INF2	9053,00
	2,7	6,11	S	18,00	Grundfos	52,32	66,00	65,64	0,28	2,50	0,32	Mediano	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	20,73	174,69	OP1	6383,00
	2,8	24,44	N	18,00	KSB	52,12	73,00	69,01	0,28	2,00	0,44	Mediano	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	28,61	1112,82	OP1	29472,00
	2,9	33,33	N	9,00	Lowara	67,52	73,00	94,97	0,64	3,00	0,16	Mediano	Bom	Bom	Bom	7,50	660,13	M	66659,00
	2.10	12,06	N	14,00	Grundfos	58,01	70,00	91,37	0,44	0,18	0,79	Mediano	Mediano	Bom	Mediano	17,13	33,83	INF2	1496,00
	2.11	3,41	S	19,00	Grundfos	60,19	60,00	118,48	0,24	3,47	-0,27	Mediano	Dados inconclusivos	Mediano	Insatisfatório	-0,32	-3,37	OP3	8063,00
	2.12	6,11	S	2,00	Lowara	58,13	72,00	93,08	0,92	2,38	1,93	Mediano	Insatisfatório	Bom	Bom	19,26	134,49	M	5290,00
	2.13	8,33	N	18,00	Grundfos	51,67	65,00	-	0,28	0,00	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Insatisfatório	20,51	1,62	OP3	60,00
	2.14	16,67	N	15,00	Efacec	63,18	69,00	18,94	0,40	7,73	-1,21	Mediano	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	8,44	803,61	OP3	72126,00
	2.15	33,33	N	12,00	Grundfos	61,65	72,40	365,92	0,52	1,61	-	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório +	Mediano	14,85	2667,93	OP3	136122,00
	2.16	-	-	-	Lowara	-	-	-	-	2,95	-	0,00	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	dos Inconclusivos	-	-	OP3	17819,00
	2.17	4,44	N	28,00	Grundfos	42,78	73,00	56,39	0,00	3,60	0,54	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	41,40	612,13	INF2	11202,00
	2.18	4,44	N	26,00	Grundfos	39,42	61,00	58,74	0,00	2,02	0,41	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	35,37	107,26	INF2	2297,00
	2.19	16,67	N	26,00	Grundfos	64,12	64,00	103,62	0,00	4,97	-0,08	Mediano	Bom	Bom	Insatisfatório	-0,18	-15,82	M	66368,00
	2.20	12,22	S	26,00	Grundfos	55,06	64,00	80,05	0,00	5,90	0,31	Mediano	Mediano	Mediano	Insatisfatório	13,97	735,58	OP1	39887,00
	2.21	4,00	N	0,00	Lowara	38,60	73,00	56,33	1,00	3,65	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Bom	47,12	521,34	INF2	8382,00
	2.22	1,67	N	26,00	Grundfos	37,75	48,50	97,91	0,00	0,31	0,41	Insatisfatório	Mediano	Bom	Insatisfatório	22,17	12,58	INF2	430,00
	2.23	10,82	S	15,00	Grundfos	60,44		-	0,40	13,70	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	43047,00
	2.24	15,29	S	11,00	Grundfos	49,99	65,00	66,02	0,56	13,70	0,91	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Mediano	23,09	1528,93	OP1	50155,00
	2.25	12,94	S	15,00	Grundfos	63,05	63,00	-	0,40	5,50	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-0,08	-	OP3	23429,00
	2.26	12,94	S	15,00	Grundfos	67,96		-	0,40	6,00	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	12318,00
	2.27	17,65	S	15,00	Grundfos	42,47		-	0,40	4,70	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	11738,00
	2.28	17,65	S	15,00	Grundfos	67,44	63,00	91,00	0,40	5,90	-0,36	Mediano	Dados inconclusivos	Bom	Mediano	-	-	OP3	35595,00
	2.29	6,47	S	13,00	KSB	44,53		-	0,48	3,90	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	6735,00
	2.30	8,82	S	15,00	Grundfos	30,62		-	0,40	4,10	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	7226,00
	2.31	12,94	S	1,00	Grundfos	68,13		-	0,96	4,40	-	Bom	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Bom	-	-	OP3	11451,00
	3,1	4,44	N	13,00	Grundfos	62,41	62,00	101,60	0,48	4,04	-0,03	Bom	Bom	Bom	Mediano	-0,66	-8,76	M	9998,00
	3,2	8,33	N	8,00	Grundfos	57,22	66,50	124,27	0,68	12,00	0,35	Bom	Mediano	Insatisfatório +	Bom	13,95	1221,54	OP1	66339,00
	3,3	33,33	S	9,00	Grundfos	66,17	67,00	102,18	0,64	6,69	-0,02	Bom	Bom	Bom	Bom	1,23	156,78	M	96279,00
	3,4	4,44	S	7,00	Lowara	35,47	67,00	51,26	0,72	1,86	1,08	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório -	Bom	47,06	208,48	OP1	3356,00
	3,5	10,59	?	3,00	0,00	58,84		-	0,88	16,88	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Bom	#DIV/0!	#DIV/0!	OP3	37772,00
	4,1	6,11	S	8,00	Grundfos	65,05	64,50	132,22	0,68	3,91	0,00	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório +	Bom	-0,85	-11,83	OP3	10489,00
	4,2	2,06	N	7,00	Lowara	32,31	56,50	99,35	0,72	0,44	4,10	Insatisfatório	Insatisfatório	Bom	Bom	42,82	39,34	OP2	696,00

Quadro 8.1 Dados utilizados para análise de desempenho dos sistemas de abastecimento de águas para as IE das: EG-A, EG-B e EG-C (*continuação*)

		Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG-C	4,3	3,22	S	19,00	Grundfos	98,97	57,00	108,63	0,35	5,69	-2,29	0,00	Dados inconclusivos	Mediano	Insatisfatório	-	-	OP3	4071,00
	4,4	83,33	S	12,00	KSB	61,86	81,00	94,93	0,52	6,13	1,51	Mediano	Insatisfatório	Bom	Mediano	23,63	9230,39	INF2	295884,00
	4,5	22,00	S	12,00	Grundfos	72,48	71,00	98,66	0,52	7,48	0,00	Bom	Dados inconclusivos	Bom	Mediano	-2,08	-	M	66126,00
	4,6	12,22	N	21,00	KSB	43,50	74,00	56,74	0,16	2,05	0,98	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	41,21	664,41	INF2	12213,00
	4,7	24,44	S	12,00	Grundfos	54,56	70,50	107,71	0,52	6,92	0,58	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	22,62	2028,21	OP1	67940,00
	4,8	35,29	?	11,00	Grundfos	61,83	65,00	63,32	0,56	15,21	0,00	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Mediano	4,88	1155,31	OP1	179524,00
	4,9	35,29	?	11,00	Grundfos	61,03	64,00	60,52	0,56	9,18	-0,09	Mediano	Bom	Insatisfatório -	Mediano	4,64	659,02	OP1	107642,00
	4.10	64,71	?	15,00	Grundfos	66,80	67,00	109,34	0,40	21,04	-0,05	Mediano	Bom	Mediano	Mediano	0,30	157,27	M	403072,00
	5,1	15,00	N	27,00	KSB	50,87	79,00	92,76	0,00	3,13	1,00	Mediano	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório	35,60	3192,48	INF2	67934,00
	5,2	53,90	N	17,00	KSB	57,95	68,50	97,49	0,32	10,53	0,27	Mediano	Bom	Bom	Insatisfatório	15,40	11869,11	OP1	583911,00
	5,3		N	2018,00	0,00	64,20		-	-	3,97	-	Mediano	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	dos Inconclusivos	-	-	OP3	62961,00
	5,4	22,00	S	20,00	KSB	61,67	76,00	81,79	0,20	6,50	0,42	Mediano	Mediano	Mediano	Insatisfatório	18,85	1828,45	OP1	73489,00
	5,5	12,22	S	26,00	Grundfos	53,37	73,00	95,37	0,00	3,65	0,56	Mediano	Mediano	Bom	Insatisfatório	26,89	550,19	INF2	15502,00
	5,6	32,26	S	10,00	Grundfos	70,36	73,00	101,29	0,60	6,15	-0,04	Bom	Bom	Bom	Mediano	3,61	561,37	M	117669,00
	5,7	1,70	N	27,00	Grundfos	26,46	43,00	47,50	0,00	1,75	0,06	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Insatisfatório	38,46	88,74	INF2	1748,00
	5,8	6,11	S	10,00	Grundfos	59,60	65,00	64,59	0,60	5,40	0,00	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Mediano	8,31	68,87	OP3	6280,00
	5,9	33,71	S	4,00	Lowara	63,42	75,00	114,47	0,84	0,20	2,14	Mediano	Insatisfatório	Mediano	Bom	15,43	79,58	OP1	3906,00
	5.10	4,44	N	28,00	Grundfos	33,44	57,00	140,99	0,00	4,00	0,41	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório +	Insatisfatório	41,34	702,34	OP1	12871,00
	5.11	3,41	N	28,00	Grundfos	63,23	60,00	113,01	0,00	5,60	-0,13	Mediano	Bom	Mediano	Insatisfatório	-5,38	-	OP3	11934,00
	5.12	2,50	S	10,00	Grundfos	30,02	54,00	48,19	0,60	5,70	1,00	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Mediano	44,40	239,79	INF2	4091,00
	6,1	20,56	S	14,00	Grundfos	47,34	70,00	62,90	0,44	8,26	0,98	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Mediano	32,38	2726,28	OP1	63795,00
	6,2	20,56	N	15,00	Grundfos	54,05	72,00	104,79	0,40	7,42	0,46	Mediano	Mediano	Bom	Mediano	24,93	4670,40	M	141951,00
	6,3	33,33	S	15,00	Grundfos	57,54	70,00	80,03	0,40	15,15	0,63	Mediano	Mediano	Mediano	Mediano	17,80	4073,89	OP1	173366,00
	6,4	50,00	N	16,00	Grundfos	59,13		104,44	0,36	14,46	-	Mediano	Dados inconclusivos	Bom	Insatisfatório	-	-	OP3	266458,00
	6,5	6,11	S	13,00	Preusak	35,31		-	0,48	20,21	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	30749,00
	6,6	24,44	S	13,00	Grundfos	44,92	64,00	86,56	0,48	20,29	1,08	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Mediano	29,81	7143,80	OP3	181563,00
	7,1	12,22	N	27,00	KSB	55,19	69,00	100,26	0,00	4,47	0,40	Mediano	Mediano	Bom	Insatisfatório	20,01	843,86	INF2	31948,00
	7,2	33,33	N	26,00	KSB	60,44	75,00	181,93	0,00	2,75	-	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório +	Insatisfatório	19,42	1176,44	OP1	45897,00
	7,3	21,76	S	6,00	Grundfos	36,16	62,00	51,70	0,76	8,90	1,97	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório -	Bom	41,68	3193,11	INF2	58035,00
	7,4	25,88	S	7,00	Preusak	40,08		-	0,72	7,95	-	Insatisfatório	dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Bom	-	-	OP3	89876,00
	7,5	7,06	N	15,00	Grundfos	52,44		77,59	0,40	8,60	-	Mediano	dados inconclusivos	Mediano	Mediano	-	-	OP3	19115,00
	8,1	1,70	S	23,00	KSB	47,16	78,00	59,27	0,08	4,92	0,99	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Insatisfatório	39,54	1797,47	INF2	34437,00

8.2 Anexo B

Quadro 8.2 Dados utilizados para análise de desempenho dos sistemas de drenagem de águas residuais para as IE das: EG-A, EG-B e EG-C

	Instalação Elevatória	Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG-A	1	15,67	Sim	2,00	Grundfos	31,65	67,00	70,65	0,90	3,23	13,87	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Bom	52,76	3120,53	OP1	35588,00
	2	13,00	Sim	13,00	Grundfos	21,72	57,00	58,47	0,35	1,09	2,10	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório -	nsatisfatório	61,90	718,19	INF2	6981,00
	3	10,30	Não	7,00	Flygt	65,25	64,00	48,48	0,65	0,45	-2,18	Bom	dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Bom	-1,96	-7,21	OP3	2214,00
	4	5,90	Não	6,00	Grundfos	0,00	24,00	805,68	0,70	0,03	-	dados inconclusivos	dados inconclusivos	Insatisfatório +	Bom	-	-36,93	OP3	66,00
	5	4,70	Sim	1,00	Flygt	60,63	67,00	52,17	0,95	1,86	-0,03	Bom	Bom	Insatisfatório -	Bom	9,50	116,65	OP1	7386,00
	6	2,30	Não	6,00	Grundfos	54,49	29,00	96,85	0,70	0,30	-	Mediano	dados inconclusivos	Bom	Bom	-87,89	-60,18	OP3	412,00
	7	1,50	Não	20,00	Grundfos	5,44	28,00	174,24	0,00	0,55	0,38	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório +	nsatisfatório	80,55	194,40	INF2	1452,00
	8	2,30	Não	13,00	Grundfos	14,26	29,00	136,40	0,35	0,29	0,44	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório +	nsatisfatório	50,84	33,20	INF2	393,00
	9	8,82	Não	19,00	KSB	23,14	49,00	112,78	0,05	0,55	0,83	Insatisfatório	Mediano	Mediano	nsatisfatório	52,78	233,62	INF2	2663,00
	10,1	3,40	Não	15,00	Grundfos	42,30	34,00	189,74	0,25	1,32	-1,29	Mediano	dados inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	-	-	OP3	3188,00
	10,2	7,50	Não	15,00	Grundfos	26,41	25,00	164,19	0,25	1,07	-0,51	Insatisfatório	dados inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	-5,64	-	OP3	4283,00
	10,3	3,40	Não	15,00	Grundfos	36,00	34,00	213,66	0,25	0,29	-1,13	Mediano	dados inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	-5,90	-	OP3	474,00
	11	9,00	Não	31,00	Grundfos	12,20	47,30	-	0,00	0,97	-	Insatisfatório	dados inconclusivos	Dados inconclusivos	nsatisfatório	74,20	1440,08	OP3	11678,00
EG-B	1.1	3,53	Não	12,00	Flygt	31,34	31,00	55,82	0,52	1,71	-0,19	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório -	Mediano	-1,09	-	OP1	3968,85
	2.1	4,90	Não	9,00	Grundfos	16,21	30,00	21,04	0,64	0,50	-0,36	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	45,96	161,52	INF2	2274,70
	3.1	2,10	Não	11,00	Grundfos	35,18	26,30	104,64	0,56	2,36	-0,93	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Bom	Mediano	-	-	OP3	4403,71
	3.2	1,60	Não	12,00	Grundfos	30,01	23,50	61,75	0,52	1,44	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Mediano	-	-	OP3	1865,52
	5.1	dados inconclusivos	Não	14,00	Pumpex	0,00	0,00	-	-	0,05	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	nconclusivos	-	-	OP3	809,42
	5.2	1,90	Não	12,00	KSB	33,05	0,00	-	0,52	0,55	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	1242,28
	5.3	15,00	Não	3,00	Flygt	72,51	75,00	118,08	0,88	4,61	-	Bom	Dados inconclusivos	Mediano	Bom	3,32	371,38	OP3	72366,98
	5.4	1,20	Sim	13,00	Lowara	8,02	20,00	72,22	0,48	1,31	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Mediano	Mediano	59,91	163,51	INF2	1766,60
	5.5	1,50	Sim	9,00	Grundfos	25,93	27,50	106,15	0,64	2,08	0,01	Insatisfatório	Bom	Mediano	Bom	5,72	36,14	OP1	4089,86
	5.6	1,81	Não	15,00	Flygt	3,23	35,00	27,01	0,40	0,23	0,58	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	90,79	148,14	INF2	1056,16
	5.7	1,81	Não	12,00	Flygt	26,86	66,00	40,56	0,52	0,92	0,43	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	59,30	263,80	INF2	2879,53
	5.8	4,80	Não	12,00	Grundfos	18,97	30,50	43,88	0,52	0,78	0,34	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	37,81	229,65	OP2	3930,92
	5.9	6,30	Não	17,00	Ritz	83,38	0,00	-	0,32	2,28	-	Bom	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	nsatisfatório	-	-	OP3	11459,15
	5.10	4,86	Não	16,00	ABS	9,61	0,00	25,20	0,36	2,49	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	nsatisfatório	-	-	OP3	13642,37
	5.11	1,30	Não	16,00	Grundfos	4,46	17,00	28,41	0,36	1,01	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	nsatisfatório	73,78	235,99	INF2	2070,19
	5.12	2,35	Não	12,00	Flygt	32,51	53,00	33,01	0,52	0,62	-0,21	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Mediano	38,66	364,16	INF2	6096,79
	5.13	17,00	Não	12,00	Flygt	6,51	58,00	24,06	0,52	0,22	1,54	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Mediano	88,77	662,38	INF2	4829,60
	5.14	3,80	Não	10,00	Flygt	39,02	0,00	-	0,60	1,21	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	12395,82
	5.15	4,90	Não	15,00	Grundfos	21,00	0,00	-	0,40	0,00	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	9545,04
	5.16	1,50	Não	9,00	Grundfos	17,17	27,40	81,12	0,64	3,89	0,31	Insatisfatório	Mediano	Mediano	Bom	37,32	413,80	INF2	7175,96
	5.17	1,30	Não	12,00	Grundfos	25,54	16,00	163,68	0,52	0,75	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Insatisfatório +	Mediano	-	-	INF2	977,86
	5.18	dados inconclusivos	Não	8,00	Flygt	9,99	0,00	-	-	2,40	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	nconclusivos	-	-	OP3	7046,71
	5.19	dados inconclusivos	Não	4,00	SIDE	0,14	0,00	-	-	1,25	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Dados inconclusivos	nconclusivos	-	-	OP3	3481,76
	7.1	20,00	Não	9,00	Grundfos	27,34	61,00	46,16	0,64	0,07	2,77	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	55,18	221,23	INF2	2594,76
	7.2	12,60	Não	14,00	Grundfos	12,79	37,00	38,92	0,44	0,21	0,59	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	65,44	414,54	INF2	4100,08
	7.3	11,00	Não	8,00	Grundfos	43,42	0,00	153,24	0,68	0,20	-	Mediano	Dados inconclusivos	Insatisfatório +	Bom	-	-	OP3	3658,65
	9.1	12,60	Não	1,00	Grundfos	16,31	37,00	24,25	0,96	3,04	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Muito Insatisfatório	Bom	55,93	3002,44	INF2	34745,91
	9.2	8,90	Não	12,00	Grundfos	17,33	33,00	51,19	0,52	2,11	0,72	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Mediano	47,50	2375,75	OP1	32373,39
	9.3	13,25	Não	1,00	Flygt	12,45	55,00	8,72	0,96	1,62	7,55	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	77,36	2171,89	INF2	18171,42
	9.4	2,10	Não	-	Grundfos	10,92	26,30	58,96	1,00	1,36	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Insatisfatório -	Bom	58,47	328,94	OP2	3641,16
	10.1	4,80	Não	11,00	Grundfos	16,25	27,00	59,67	0,56	0,63	0,52	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório -	Mediano	39,82	338,21	OP1	5497,82
	10.2	8,90	Não	11,00	Grundfos	29,61	33,00	131,29	0,56	0,35	0,04	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório +	Mediano	10,26	90,99	OP1	5738,74

Quadro 8.2 Dados utilizados para análise de desempenho dos sistemas de drenagem de águas residuais para as IE das: EG-A, EG-B e EG-C (*continuação*)

	Instalação Elevatória	Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG-B	10.3	2,90	Não	11,00	Grundfos	27,86	37,00	79,30	0,56	0,97	0,56	Insatisfatório	Mediano	Mediano	Mediano	24,70	168,12	OP1	4405,24
	10.4	6,50	Não	11,00	Grundfos	26,70	38,00	128,54	0,56	0,36	0,75	Insatisfatório	Mediano	Insatisfatório +	Mediano	29,73	178,56	OP1	3886,80
	13.1	28,00	Não	15,00	Grundfos	12,92	35,00	28,54	0,40	0,39	0,32	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	63,10	1506,38	INF2	15451,95
	15.1	2,10	Não	11,00	Grundfos	32,61	26,30	111,00	0,56	0,40	-	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Mediano	Mediano	-	-	OP3	645,90
	15.2	4,90	Sim	11,00	Grundfos	29,51	28,00	87,62	0,56	0,78	-0,23	Insatisfatório	Dados inconclusivos	Mediano	Mediano	-	-	INF2	3492,46
	1,1	8,87	Sim	10,00	ABS	26,62	0,00	-	0,50	0,40	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	2645,00
	1,2	16,25	Sim	10,00	Flygt	49,10	52,00	44,11	0,50	0,28	-0,71	Mediano	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	5,57	22,99	OP3	2672,00
	1,3	10,22	Sim	10,00	Flygt	23,88	68,50	18,58	0,50	0,55	0,11	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Mediano	65,13	248,76	INF2	2472,00
	1,4	8,22	Sim	10,00	Flygt	24,43	44,00	24,76	0,50	1,03	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	44,48	298,72	INF2	4347,00
	1,5	8,81	Sim	10,00	Flygt	18,86	44,00	15,48	0,50	0,19	0,61	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	57,13	83,68	INF2	948,00
	1,6	4,67	Sim	10,00	Flygt	42,57	44,00	-	0,50	0,33	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	3,25	4,84	OP3	962,00
	1,7	24,44	Sim	10,00	Flygt	31,55	44,00	51,21	0,50	1,00	-0,06	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório -	Mediano	28,29	440,46	OP1	10078,00
	1,8	8,22	Sim	9,00	Flygt	19,66	44,00	15,04	0,55	1,07	0,04	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Mediano	55,31	435,62	INF2	5098,00
	1,9	27,50	Sim	13,00	Flygt	37,67	61,67	74,01	0,35	0,23	-0,05	Insatisfatório	Bom	Mediano	nsatisfatório	38,91	171,68	OP1	2856,00
	1.10	4,78	Sim	7,00	Flygt	33,45	36,00	52,26	0,65	0,60	-0,06	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório -	Bom	7,09	14,82	OP1	1352,00
	1.11	16,67	Sim	3,00	Flygt	38,55	57,00	-	0,85	0,69	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Bom	32,37	377,37	OP3	7545,00
	2,1	8,22	Sim	7,00	Flygt	33,74	56,00	38,66	0,65	2,08	0,04	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	39,76	454,62	INF2	7401,00
	2,2	12,50	Não	1,00	Grundfos	52,23	37,00	42,61	0,95	2,13	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	Bom	-	-	OP3	5209,00
	2,3	2,89	Não	21,00	KSB	47,53	50,00	235,90	0,00	0,15	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	4,93	2,18	OP3	286,00
	2,4	3,75	Não	13,00	Grundfos	46,39	26,00	60,62	0,35	0,19	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Insatisfatório -	nsatisfatório	-	-	OP3	333,00
	2,5	2,20	Sim	10,00	Grundfos	30,23	22,00	-	0,50	0,13	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	144,00
	2,6	3,88	Sim	7,00	Grundfos	28,56	26,00	70,58	0,65	0,24	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Mediano	Bom	-	-	OP3	504,00
	2,7	4,67	Sim	5,00	Flygt	1,35	56,00	7,82	0,75	0,41	2,73	Insatisfatório	Insatisfatório	Muito Insatisfatório	Bom	97,59	898,22	INF2	5957,00
	3,1	3,00	Sim	8,00	Flygt	32,12	50,00	136,48	0,60	0,04	1,61	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório +	Mediano	35,76	3,31	OP1	60,00
	3,2	3,00	Sim	8,00	Flygt	25,72	50,00	115,26	0,60	0,05	2,66	Insatisfatório	Insatisfatório	Mediano	Mediano	48,56	5,48	INF2	73,00
	3,3	3,00	Sim	8,00	Flygt	32,98	45,00	92,95	0,60	0,52	0,25	Insatisfatório	Bom	Bom	Mediano	26,71	27,69	OP1	671,00
	3,4	8,22	Sim	8,00	Flygt	27,80	55,00	35,81	0,60	0,12	0,78	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Mediano	49,46	36,68	INF2	480,00
	3,5	4,67	Sim	8,00	Flygt	36,06	55,00	51,41	0,60	0,09	-0,13	Insatisfatório	Bom	Insatisfatório -	Mediano	34,43	14,15	OP1	266,00
	3,6	2,67	Sim	7,00	Flygt	37,48	60,00	36,18	0,65	0,80	0,36	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	37,53	63,32	INF2	1092,00
	3,7	8,22	Sim	3,00	Flygt	31,03	56,00	53,70	0,85	0,16	-0,34	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Insatisfatório -	Bom	44,60	50,78	OP1	737,00
	3,8	4,67	Sim	0,00	Flygt	30,85	56,00	29,86	1,00	0,75	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	Bom	44,91	94,57	INF2	1363,00
	4,1	3,50	Sim	21,00	Grundfos	37,57	38,50	92,49	0,00	0,11	0,02	Insatisfatório	Bom	Bom	nsatisfatório	2,41	0,67	M	179,00
EG-C	5,1	12,44	Não	16,00	Grundfos	45,14	0,00	6,64	0,20	0,43	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	nsatisfatório	-	-	OP3	1538,00

Quadro 8.2 Dados utilizados para análise de desempenho dos sistemas de drenagem de águas residuais para as IE das: EG-A, EG-B e EG-C (*continuação*)

	Instalação Elevatória	Potência absorvida (kW)	Variador de Velocidade (S/N)	Idade(anos)	Marca (-)	Rendimento Estimado (%)	Rendimento ótimo (%)	Q/Qn (-)	IVI Bombas (-)	Período de funcionamento por IE (h/dia)	Degradação anual (%/ano)	Avaliação da Eficiência (-)	Avaliação da Degradação(-)	Avaliação do dimensionamento Q/Qn(-)	Avaliação da Vida Residual (VR)	Variação de rendimento relativamente ao rendimento ao ótimo (%)	Poupança potencial (€)	Medidas de Melhoria(-)	Consumo de energia (kWh)
EG-C	5,2	4,90	Sim	11,00	Grundfos	51,39	27,50	88,09	0,45	0,68	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Mediano	Mediano	-	-	OP3	1447,00
	6,1	2,67	Sim	6,00	Flygt	43,84	60,00	54,05	0,70	2,71	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Insatisfatório -	Bom	26,93	125,07	OP1	3006,00
	7,1	4,55	Sim	11,00	Grundfos	42,34	29,00	98,91	0,51	0,69	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Bom	Mediano	-	-	OP3	1650,00
	8,1	5,20	Não	16,00	Grundfos	52,95	0,00	67,46	0,20	0,54	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Insatisfatório -	nsatisfatório	-	-	OP3	1132,00
	8,2	2,33	Não	19,00	KSB	67,11	0,00	330,58	0,05	0,25	-	Bom	Dados Inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	-	-	OP3	416,00
	8,3	18,89	Sim	11,00	KSB	21,49	31,00	29,12	0,45	0,30	-0,32	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Muito Insatisfatório	Mediano	30,67	112,23	INF2	2368,00
	8,4	16,67	Sim	8,00	Flygt	30,23	60,00	23,86	0,60	0,59	-0,03	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Mediano	49,62	291,23	INF2	3799,00
	8,5	5,25	Sim	8,00	Flygt	20,90	65,00	-	0,60	0,06	-0,11	Insatisfatório	Bom	Dados inconclusivos	Mediano	67,84	21,07	OP3	201,00
	8,6	1,88	Sim	8,00	Flygt	52,02	65,00	-	0,60	0,02	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	19,96	0,83	OP3	27,00
	8,7	3,88	Sim	8,00	Flygt	61,69	66,00	63,92	0,60	0,46	-0,21	Bom	Bom	Insatisfatório -	Mediano	6,54	13,79	OP1	1366,00
	9,1	1,60	Não	14,00	Grundfos	45,65	19,40	99,72	0,30	0,05	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Bom	nsatisfatório	-	-	OP3	30,00
	9,2	2,20	Não	14,00	Grundfos	61,87	22,00	175,68	0,30	0,64	-	Bom	Dados Inconclusivos	Insatisfatório +	nsatisfatório	-	-	INF2	520,00
	9,3	3,33	Não	14,00	Grundfos	30,51	26,00	76,37	0,30	0,69	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Mediano	nsatisfatório	-	-	OP3	1390,00
	9,4	8,48	Sim	11,67	Grundfos	28,78	37,00	-	0,36	0,52	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	nsatisfatório	22,22	105,92	OP3	3085,00
	9,5	3,75	Não	13,00	Grundfos	46,47	26,00	70,17	0,35	0,07	-	Mediano	Dados Inconclusivos	Mediano	nsatisfatório	-	-	OP3	79,00
	9,6	1,60	Não	12,00	Grundfos	32,75	23,50	148,22	0,40	0,08	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Insatisfatório +	Mediano	-	-4,13	OP3	68,00
	9,7	1,56	Sim	8,00	Grundfos	31,17	16,00	-	0,60	0,05	-	Insatisfatório	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	-	-	OP3	49,00
	10,1	5,25	Sim	8,00	Flygt	43,04	65,00	-	0,60	0,04	-0,38	Mediano	Dados Inconclusivos	Dados inconclusivos	Mediano	33,78	4,44	OP3	85,00
	11,1	4,78	Sim	7,00	Flygt	18,79	36,00	31,59	0,65	2,50	0,60	Insatisfatório	Mediano	Muito Insatisfatório	Bom	47,82	409,81	INF2	5547,00
	11,2	4,78	Sim	7,00	Flygt	21,30	36,00	44,74	0,65	0,56	0,10	Insatisfatório	Bom	Muito Insatisfatório	Bom	40,82	86,16	INF2	1366,00
	11,3	1,89	Sim	7,00	Flygt	38,78	37,00	100,02	0,65	0,10	-0,25	Insatisfatório	Bom	Bom	Bom	-	-0,69	M	93,00

8.3 Anexo C

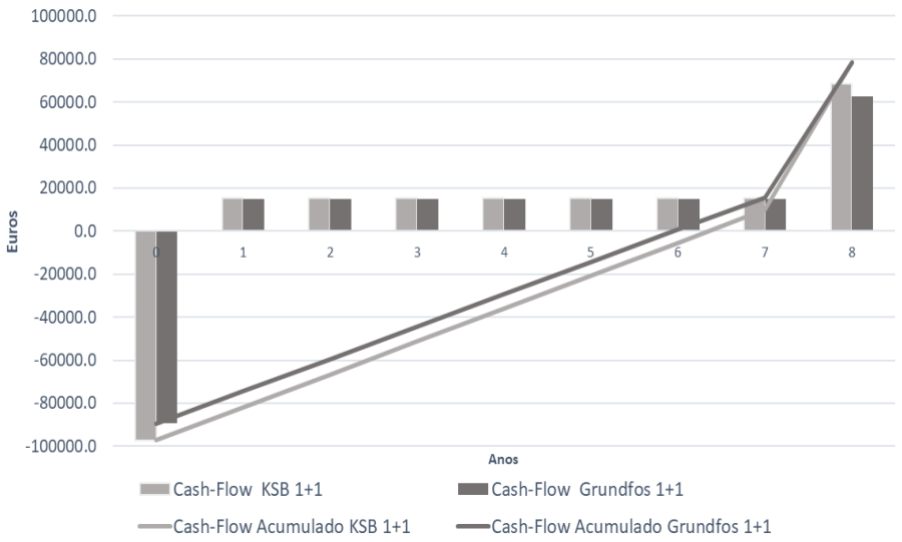


Figura 8.1 Cash Flow da análise comparativa entre a solução 1.3 e 2.3

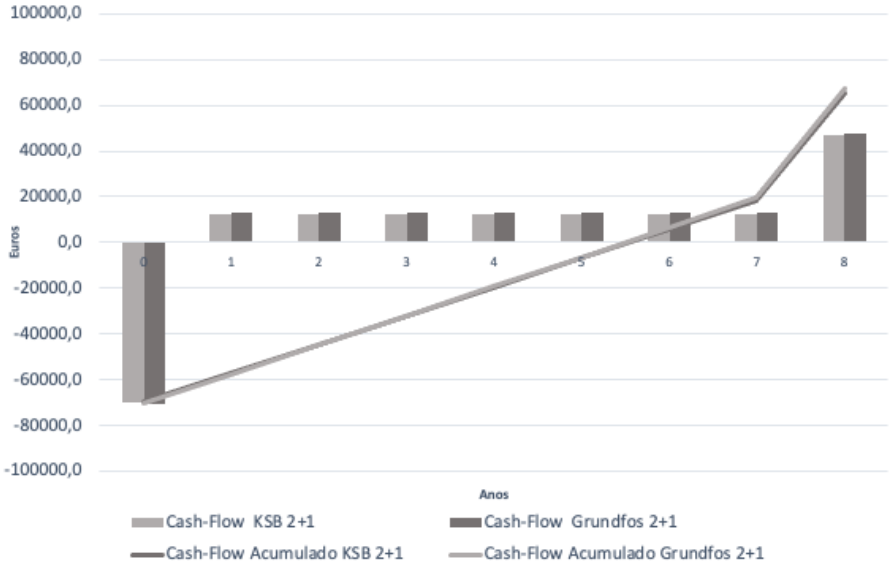


Figura 8.2 Cash Flow da análise comparativa entre a solução 1.5 e 2.5