

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em
Estações de Tratamento de Águas Residuais – Caso de
Estudo**

Ruben Filipe Capela Pinto Alves

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
David Salema
Santino Di Berardino

2016

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em
Estações de Tratamento de Águas Residuais – Caso de
Estudo**

Ruben Filipe Capela Pinto Alves

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
David Salema
Santino Di Berardino

2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu coorientador, Mestre David Salema, pela dedicação, preocupação, disponibilidade e transmissão de conhecimento que contribuíram, em muito, para a execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Doutor Santino Di Berardino, pela transmissão de conhecimento ao longo deste processo, pelo companheirismo demonstrado e pela constante motivação.

Ao Engenheiro Luís Hagatong pela disponibilidade demonstrada e por me ter proporcionado o acompanhamento de trabalhos desenvolvidos pela Schneider Electric Portugal.

A todos aqueles que, apesar de não estarem diretamente ligados a este trabalho, contribuíram com algo que me auxiliou na sua execução, em especial ao Engenheiro António Abreu e à Doutora Susana Camelo.

Gostaria de destacar a importância da minha família pelo esforço que fizeram em todo o meu processo de formação, pelo grande apoio demonstrado em todos os momentos e decisões da minha vida e por me terem permitido talhar o meu caminho. A todos eles, o meu obrigado.

Por fim, um agradecimento especial à Nádia, pela amizade, paciência e força transmitida ao longo deste processo. O apoio transmitido fez, muitas vezes, a diferença, tornando tudo mais fácil.

RESUMO

Nos últimos anos, no sector do tratamento das águas residuais, a maior parcela de encargos está relacionada com os consumos de energia. Segundo “PENSAAR 2020 - Uma nova estratégia para o setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais”, estima-se que o peso deste recurso represente cerca de 38% do total dos encargos relativos aos sistemas municipais de águas residuais.

Com o presente trabalho pretendeu-se avaliar as condições de uso e consumo da energia, bem como definir e avaliar bases metodológicas dedicadas à avaliação do desempenho energético de estações de tratamento de águas residuais.

Para o efeito foram objeto de análise e tratamento, os resultados relativos a um caso de estudo, que compreendeu a realização de um conjunto de auditorias energéticas e processuais a um conjunto de 13 ETAR localizadas em Portugal Continental, na região de Lisboa e Vale do Tejo, e deste modo avaliar de que forma a energia é utilizada e estimar a distribuição de consumos pelo conjunto dos processos existentes nestas instalações.

Esta análise possibilitou a obtenção de informação pertinente acerca dos processos, equipamentos, características técnicas e modo de funcionamento habitualmente existentes neste tipo de instalações, bem como, um conhecimento abrangente acerca da distribuição dos seus consumos energéticos, tendo em atenção questões relacionadas com a dimensão e localização.

Foram ainda identificados e calculados os indicadores energéticos usualmente utilizados em sede de avaliação do desempenho energético deste tipo de instalações. A análise efetuada aos resultados obtidos evidenciou que a utilização dos mesmos para os efeitos em causa seja, na generalidade dos casos, desadequada. Neste contexto foi avaliada, com recurso aos princípios da análise de regressão multivariável, a existência de uma relação matemática entre a variável dependente e as variáveis independentes por forma a justificar a variação do consumo de energia da amostra de instalações. Procurou-se, com o desenvolvimento do modelo em causa, criar uma ferramenta que efetuasse comparações entre os consumos de energia gerados pelo modelo e os consumos de energia reais, possibilitando assim uma avaliação comparativa do desempenho energético das instalações e o desenvolvimento de um indicador baseado na relação entre os consumos reais e os expectáveis de determinada instalação.

A avaliação estatística e a análise crítica aos dados de base e gerados pelo modelo permitiu concluir que, apesar de definido, o modelo terá de ser alvo de reformulações, nomeadamente no que diz respeito à definição de grupos de ETAR com características e dimensão semelhantes de forma a conseguir definir modelos mais precisos e direcionados para determinadas tipologias. Conclui-se ainda que o grande entrave à definição de modelos de avaliação do desempenho energético neste tipo de utilizações, está relacionado com a falta de representatividade dos dados disponíveis relativos a variáveis processuais com influência determinante no uso e consumo de energia das instalações em análise.

Palavras-chave: Uso e Consumo de Energia; Metodologia de Avaliação do Desempenho Energético; ETAR; Eficiência Energética;

ABSTRACT

In recent years, the highest cost share in the sector of wastewater treatment was attributed to energy consumption. According to "PENSAAR 2020 - A new strategy for the water and wastewater sanitation sector," it is estimated that this amounts to approximately 38% of total charges for municipal wastewater systems.

This paper aims to review the energy usage and consumption, and identify and evaluate methodological foundations assessing the energy performance of wastewater treatment plants.

This was achieved by reviewing the results of a case study, which audited 13 wastewater treatment plants in Portugal, in the region of Lisboa and Vale do Tejo, and thereby assessing how energy is used and estimating the distribution of consumption in these facilities.

Through an analysis, relevant information about the processes, equipment, technical characteristics and mode of operation, which usually exist in these facilities, was obtained. Additionally, comprehensive knowledge of the distribution of its energy consumption, taking into consideration size and location, was gained.

The indicators identified and calculated were also used for the evaluation of energy performance. Analysis of the results showed that using those indicators for the purpose of this paper is, in most cases, inadequate. Hence, through a multivariate regression, it was found that a relationship between the dependent and independent variables, explaining a change in energy consumption of the sampled facilities, existed. By developing this model, a tool was created which compared the energy consumption between the expected and actual values.

The statistical evaluation and analysis lead to the opinion that the model needs to be improved, specifically with regards to WWTP groups which have similar characteristics, in order to obtain accurate results. Moreover, the lack of sufficient data restricts a detailed conclusion on the influence of energy usage of the facilities.

Keywords: Energy use and consumption; Energy performance assessment methodology; WWTP; Energy Efficiency;

LISTA DE SIGLAS

ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
SGCIE	Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia
CIE	Consumidor Intensivo de Energia
PEAASAR	Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais
PO SEUR	Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos
SST	Sólidos Suspensos Totais
CQO	Carência Química de Oxigénio
CBO	Carência Bioquímica de Oxigénio
SV	Sólidos Voláteis
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
VEV	Variador Eletrónico de Velocidade
CEE	Consumo Especifico de Energia
IE	Intensidade Energética
VAB	Valor Acrescentado Bruto
IC	Intensidade Carbónica
MRCE	Medidas de Racionalização dos Consumos de Energia
CV(RMSE)	Coefficiente de Variação do Erro Médio Quadrado

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	1
2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	2
3. INTRODUÇÃO	3
4. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	10
4.1 Análise Contextual.....	10
4.2 Uso e Consumo de Energia nas Fases e Processos de Tratamento	12
4.2.1 Tratamento Preliminar	13
4.2.2 Tratamento Primário.....	14
4.2.3 Tratamento Secundário ou Biológico	16
4.2.4 Tratamento Terciário	18
4.2.5 Tratamento Lamas	19
4.2.6 Tratamento do Ar	23
4.3 Avaliação do Desempenho Energético e sua Aplicação a ETAR.....	25
4.3.1 Protocolos de Medição e Verificação	25
4.3.2 Benchmarking	28
4.3.3 Indicadores Energéticos	30
4.3.3.1. Indicadores SGCIE.....	31
4.3.3.2. Outros Indicadores	34
4.3.4 Valor Sustentável.....	36
4.3.5 Energy Score	39
5. CASO DE ESTUDO	41
5.1 Enquadramento	41
5.2 Caracterização Genérica das Instalações	41
5.3 Ações Desenvolvidas	43
6. ANÁLISE E TRATAMENTO DE RESULTADOS.....	46
6.1 Caracterização genérica das instalações	46
6.2 Caracterização do Processo Produtivo	48
6.3 Dados de Produção.....	51
6.3.1 Quantidade e Qualidade do Afluente.....	51
6.3.2 Produção de Lamas.....	55
6.4 Uso e Consumo de Energia	56
6.4.1 Consumos de Energia Elétrica	57
6.4.2 Perfil de Consumos.....	58

6.4.3 Desagregação dos Consumos	60
6.5 Indicadores de Desempenho	70
6.5.1 Consumo Especifico de Energia.....	71
6.5.2 Intensidade Energética	76
6.5.3 Intensidade Carbónica.....	76
6.5.4 Valor Sustentável.....	77
6.6 Relação entre Consumos e Produção	78
7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	85
7.1 Base Metodológica.....	85
7.2 Análise Global	89
7.2.1 Definição do Modelo e Apresentação de Resultados	90
7.2.2 Utilização do Modelo e Coeficiente de Desempenho	94
8. CONCLUSÕES	96
9. TRABALHO FUTURO	98
10. BIBLIOGRAFIA	99
11. ANEXOS	103

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Resumo das poupanças totais alcançadas com o PNAEE (PNAEE 2016, Resolução do Conselho de Ministros nº20/2013, de 10 de Abril)	6
Tabela 3.2 – População com interligação à rede de tratamento de águas residuais (%) (Eurostat, 2015)	7
Tabela 4.1 - Parâmetros de qualidade da água (Decreto-Lei nº 152/97).....	12
Tabela 4.2 - Processos de Oxidação Aeróbia	16
Tabela 4.3 - Vantagens e Desvantagens da digestão anaeróbia (Di Bernardino, 2001).....	20
Tabela 4.4 –Visão geral das opções do IPMVP (EVO, 2009).....	27
Tabela 4.5 - Opções existentes no protocolo de M&V da ASHRAE (ASHRAE Guideline 14) – adaptado de (Natural Resources Canada's CanmetENERGY, 2008).....	28
Tabela 4.6 - Eficiência padrão de oxigenação de sistemas de arejamento (Environmental Dynamics International) & (Stenstrom & Rosso))	29
Tabela 4.7 - Consumo específico típico de diferentes processos de tratamento (Focus on Energy, 2006)	29
Tabela 5.1 - Características de funcionamento das ETAR	42
Tabela 6.1 - Parametrização utilizada na definição de tipologias de ETAR	46
Tabela 6.2 - Separação das ETAR por tipologia.....	47
Tabela 6.3 - Etapas processuais afetas a cada instalação	49
Tabela 6.4 - Análises periódicas de carga poluente afluente à ETAR – ETAR “E”	54
Tabela 6.5 - Concentrações de cargas poluentes registadas (mg/l).....	54
Tabela 6.6 - Processos e subprocessos considerados para efeitos de análise (desagregação de consumos)	61
Tabela 6.7 - Consumo específico de energia	71
Tabela 6.8 - Coeficiente de Determinação (R^2).....	73
Tabela 6.9 - Intensidade energética	76
Tabela 6.10 - Indicador “Valor Sustentável”.....	77
Tabela 6.11 - Resultados dos modelos alcançados	78
Tabela 6.12 - Análise de regressão multivariável – Resultados do modelo (ETAR “M”).....	80
Tabela 6.13 - Análise de regressão multivariável – Variáveis independentes (ETAR “M”)	80
Tabela 6.14 - Análise de regressão multivariável – Resultados do modelo (ETAR “L”).....	82
Tabela 6.15 - Análise de regressão multivariável – Variáveis independentes (ETAR “L”)	82
Tabela 6.16 – Variação de consumos mensais nas instalações em análise	83
Tabela 7.1 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados do modelo global	90
Tabela 7.2 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados das variáveis independentes	90

Índice de Figuras

Figura 3.1 - Evolução da dependência energética em Portugal (adaptado de DGEG (2015))	3
Figura 3.2 - Evolução dos Consumos de Energia Primária e Final (adaptado DGEG (2015))	4
Figura 3.3 - Evolução da intensidade energética da generalidade dos países da UE e de Portugal – Energia Primária (kgep/1000€) (Eurostat, 2015).....	5
Figura 3.4 - Consumo de energia final por setor de atividade (DGEG).....	5
Figura 3.5 - Perfil de gastos diretos nos sistemas municipais de águas residuais (PENSAAR 2020, 2014).....	8
Figura 4.1 - Ciclo urbano da água (INNERS, n.d).....	10
Figura 4.2 - Esquema típico do processo de tratamento de uma ETAR (adaptado de Simarsul)	13
Figura 4.3 - Diagrama de carga do compressor do processo de Desarenamento e Desengorduramento (Schneider Electric, 2015).....	14
Figura 4.4 - Esquema interior de um decantador (Monroe Environmental, 2015).....	15
Figura 4.5 - Diagrama de carga do processo de arejamento, em modo temporizado (Schneider Electric, 2015).....	17
Figura 4.6 - Diagrama de carga do processo de arejamento, a operar em função do potencial redox (Schneider Electric, 2014).....	18
Figura 4.7 - Diagrama de carga de uma bomba centrífuga e respetivo motor auxiliar (Schneider Electric, 2015).....	21
Figura 4.8 - Diagrama de carga filtro de banda (Schneider Eléctric, 2014).....	22
Figura 4.9 - Diagrama de carga de uma bomba de recirculação de lamas (Schneider Electric, 2015).....	23
Figura 4.10 - Diagrama de carga referente a um ventilador do processo de desodorização (Schneider Electric, 2014).....	24
Figura 4.11 - Consumo de energia vs Volume de água tratada; Consumo de energia vs CBO removido - adaptado de (Silva & Rosa, 2015)	35
Figura 4.12 - Consumo de energia vs Volume de água tratado para quatro tipos de tratamento (Silva & Rosa, 2015).....	35
Figura 4.13 - Consumo de energia por kg de CBO removido em diferentes países (Silva & Rosa, 2015).....	36
Figura 4.14 - Valores de referência obtidos – adaptado de (Silva & Rosa, 2015).....	36
Figura 4.15 - Matriz de Hierarquização das funções e determinação dos coeficientes de ponderação	37
Figura 4.16 - Distribuição ETAR – adaptado de (Energy Star, 2014).....	40
Figura 5.1 - Localização das ETAR analisadas	41
Figura 6.1 - Fluxograma das instalações analisadas	50
Figura 6.2 - Volume anual de água residual tratada por instalação (m ³ /ano).....	51

Figura 6.3 - Quantidade de carga poluente removida (kg/ano)	53
Figura 6.4 - Volume e carga poluente das águas residuais afluentes à ETAR (Schneider Electric, 2015)	55
Figura 6.5 - Produção anual de lamas desidratadas	56
Figura 6.6 - Consumo anual de energia elétrica por instalação (incluindo energia produzida através da cogeração)	57
Figura 6.7 - Distribuição percentual dos consumos por classe tarifária	58
Figura 6.8 - Diagramas de carga médios anuais	59
Figura 6.9 - Desagregação dos consumos elétricos por etapa processual (kWh/ano)	62
Figura 6.10 - Desagregação dos consumos elétricos por etapa processual (%)	63
Figura 6.11 - Desagregação conjunta ETAR de Pequena Dimensão	63
Figura 6.12 - Desagregação conjunta ETAR de Média Dimensão	64
Figura 6.13 - Desagregação conjunta ETAR de Grande Dimensão	64
Figura 6.14 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento preliminar + Tratamento Primário" (kWh/ano)	66
Figura 6.15 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento preliminar + Tratamento Primário" (%)	66
Figura 6.16 - Desagregação do tratamento secundário por subprocesso (kWh/ano)	67
Figura 6.17 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento secundário" (%)	68
Figura 6.18 - Desagregação do Tratamento de Lamas, por subprocesso (kWh/ano)	69
Figura 6.19 - Desagregação do Tratamento de Lamas, por subprocesso (%)	69
Figura 6.20 – Consumos específicos mensais de energia elétrica por volume afluente	72
Figura 6.21 – Relação entre consumo específico de energia (kWh/m ³) e a razão entre o volume tratado e o projetado	73
Figura 6.22 - Relação entre consumos de energia e volume de água tratado – ETAR “M”	74
Figura 6.23 - Relação entre consumo de energia e carga de CBO removida – ETAR “I”	74
Figura 6.24 - Relação entre consumo de energia e carga de CQO removida – ETAR de “J”	74
Figura 6.25 - Relação entre consumo de energia e carga de SST removida – ETAR “K”	75
Figura 6.26 - Relação entre consumo de energia e lama produzida – ETAR “H”	75
Figura 6.27 - Relação entre consumo de energia e volume tratado - triénio 2011 a 2013	79
Figura 6.28 - Relação entre consumo de energia e volume tratado - séries isoladas (2011 a 2013)	79
Figura 6.29 - Consumos mensais de energia elétrica (valores reais e gerados pelo modelo)	81
Figura 6.30 - Consumos mensais de energia elétrica (valores reais e gerados pelo modelo)	83
Figura 7.1 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (Volume afluente tratado)	92

Figura 7.2 – Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (CQO Removido).....	92
Figura 7.3 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (Volume afluente tratado).....	93
Figura 7.4 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (CQO Removido).....	93

1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O sector associado ao tratamento de águas residuais tem vindo a assumir uma crescente importância no âmbito do uso e consumo de recursos energéticos e em matérias relevantes com estes relacionadas (emissão de gases com efeito de estufa, dependência energética, entre outros).

Importa, desta forma, definir estratégias e procedimentos dedicados à melhoria contínua da eficiência e eficácia das instalações chave deste processo: as estações de tratamento de águas residuais.

Verifica-se, no entanto, que as metodologias de análise habitualmente utilizadas em sede de avaliação do desempenho energético destas instalações não incorporam, por norma, a influência de variáveis independentes e de fatores estáticos nos consumos de energia. Este facto tem conduzindo a interpretações erróneas e desadequadas do grau de desempenho das ETAR e à realização de exercícios de *benchmarking* desajustados.

Neste contexto, a presente dissertação teve como propósito a avaliação das condições de uso e consumo de energia e a definição e avaliação de bases metodológicas dedicadas à avaliação efetiva do desempenho energético de estações de tratamento de águas residuais (ETAR).

Para o efeito, utilizou-se informação decorrente de uma revisão bibliográfica dedicada às várias temáticas em causa e são analisados, em detalhe, os resultados relativos a um caso de estudo que compreendeu a realização de análises processuais e energéticas detalhadas a 13 ETAR localizadas na região de Lisboa e Vale do Tejo.

Na eventual observação de particularidades não contextualizadas na bibliografia analisada e/ou às quais não se consiga dar resposta no âmbito do presente estudo, pretendeu-se definir linhas de investigação que permitam desenvolver a temática em análise e promover a persecução do objetivo supracitado.

2. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A presente dissertação encontra-se estruturada em quatro grandes grupos. Numa primeira fase é feita uma pesquisa bibliográfica tendo em vista a sustentação teórica do trabalho em causa e a identificação/definição de linhas orientadoras da análise a realizar. Numa segunda etapa é apresentado o caso de estudo, no âmbito do qual são caracterizadas em detalhe 14 instalações, a nível processual e energético, e calculados os indicadores energéticos comumente utilizados neste sector e nos documentos normativos que o regulamentam. Na terceira fase, com base na informação e resultados decorrentes das fases anteriores, é desenvolvida e testada uma metodologia de avaliação do desempenho energético de ETAR. Por último, são apresentadas as principais conclusões decorrentes do trabalho realizado e, com base nestas, são identificadas e sugeridas linhas de trabalho conducentes à resolução das limitações e constrangimentos identificados e à persecução dos objetivos traçados.

Nos pontos subsequentes resumem-se os conteúdos a que se referem os vários capítulos.

- Capítulo 1 – É feito um primeiro enquadramento do trabalho e são definidos os objetivos propostos na presente dissertação.
- Capítulo 2 – É explicitada a sequência estrutural em que assentou o estudo e são mencionados os conteúdos abordados em cada um dos capítulos.
- Capítulo 3 – É feita uma introdução ao tema e à problemática relacionada, sendo destacada informação pertinente relacionada com os impactos que o tratamento de águas residuais acarreta.
- Capítulo 4 – É apresentada uma breve introdução teórica relativa ao tratamento de águas residuais, tendo em conta as suas etapas processuais e respetivas condições de uso e consumo de energia. Apresentam-se os resultados de uma pesquisa bibliográfica relacionada com metodologias de avaliação do desempenho, bem como a sua aplicabilidade às ETAR.
- Capítulo 5 – Neste capítulo é apresentado um caso de estudo onde são descritas as tarefas executadas no âmbito do trabalho em causa, juntamente com uma caracterização detalhada do processo produtivo de um conjunto de ETAR.
- Capítulo 6 – Neste capítulo foram tratados, de forma conjunta, os dados recolhidos no âmbito do caso de estudo, permitindo caracterizar as diversas instalações do ponto de vista qualidade do afluente, mas também das condições de uso e consumo de energia. São também calculados diversos indicadores energéticos, comumente utilizados neste sector, e avaliada a relação entre o consumo de energia e a produção.
- Capítulo 7 – É desenvolvida e testada uma metodologia de avaliação do desempenho energético em ETAR, com base num modelo estatístico e conseqüente análise de resultados.
- Capítulo 8 – São apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido
- Capítulo 9 – São indicadas as direções a seguir no desenvolvimento de trabalho futuro relacionado com a presente dissertação.

3. INTRODUÇÃO

Atualmente, nos vários setores da sociedade, existe uma crescente preocupação com os consumos de energia, bem como com as emissões de gases com efeito de estufa a estes associados. A esta temática está associada a preocupação com a garantia da redução da dependência energética externa que Portugal tem vindo a ter nas últimas décadas.

A inexistência, em quantidade e qualidade que justifique a sua exploração nas condições de mercado atuais, de recursos energéticos endógenos fósseis, e a forte contribuição destes para o *mix* energético nacional, conduz a uma elevada dependência energética do exterior em termos de energia primária. É importante realçar que as variações existentes ao longo dos anos devem-se, em parte, a uma aposta clara nas energias renováveis, em especial à energia hídrica e eólica.

Na figura 3.1 é apresentada a evolução anual da dependência energética que Portugal teve do exterior, até ao ano de 2014.

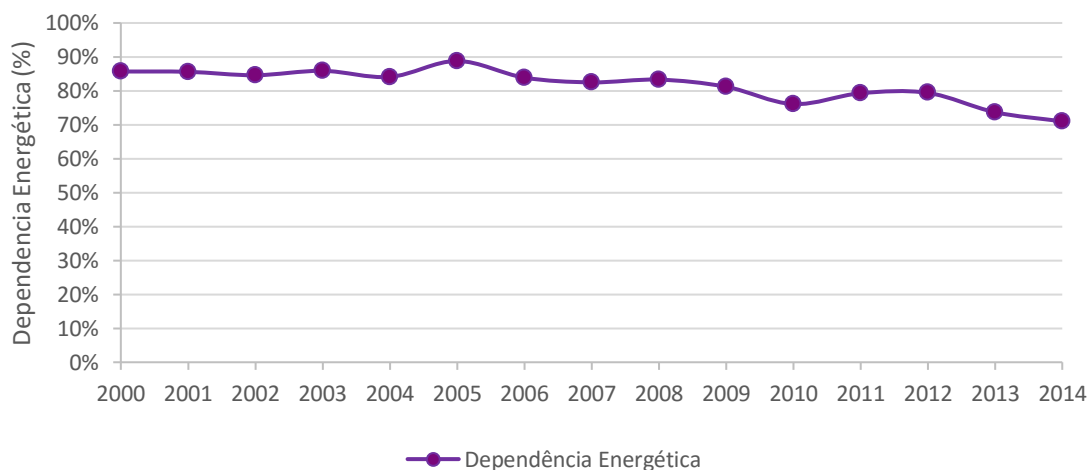


Figura 3.1 - Evolução da dependência energética em Portugal (adaptado de DGEG (2015))

Os resultados apresentados na Figura 3.1 evidenciam a necessidade de desenvolver e implementar tecnologias, metodologias, modelos e processos que possibilitem uma mais eficaz gestão dos recursos energéticos e que permitam tornar Portugal num país energeticamente mais eficiente, possibilitando condições otimizadas de uso e consumo de recursos energéticos, e ao mesmo tempo aumentar o contributo das energias renováveis para que globalmente, a dependência energética seja reduzida.

De acordo com a Figura 3.2, nos últimos anos, Portugal evidencia uma tendência de redução dos seus consumos de energia primária e final (valores absolutos). Para além da influência de fatores socioeconómicos, esta diminuição deve-se, em parte, à diminuição de consumo dos produtos derivados de petróleo, decorrente de ações e medidas dedicadas à promoção e persecução dos compromissos assumidos no âmbito de políticas climáticas europeias (Resolução do Conselho de Ministros nº20/2013, de 10 de Abril): Redução em 20% da emissão de gases com efeito de estufa (GEE), face a 1990, o aumento em 20% do consumo de energia proveniente de fontes renováveis de energia e 20% de redução do consumo de energia primária, a partir do aumento de eficiência energética, relativamente ao consumo espetável para 2020.

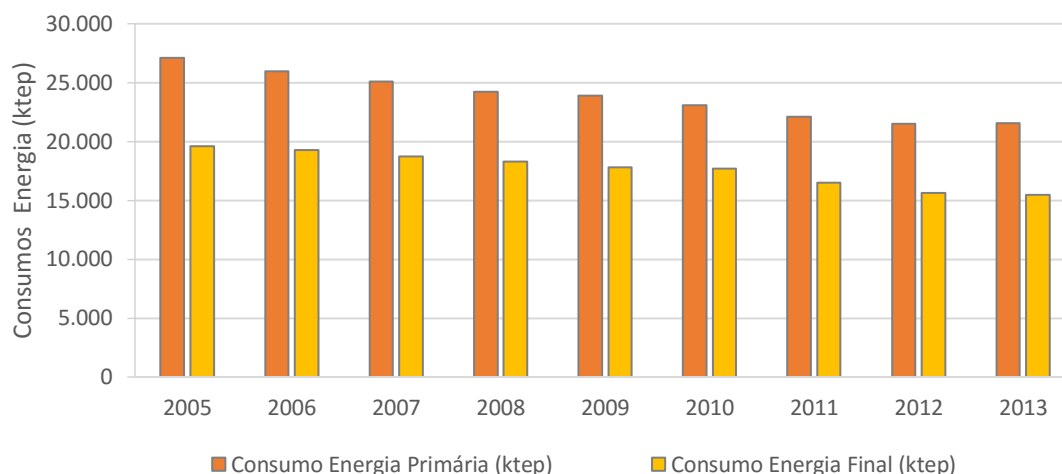


Figura 3.2 - Evolução dos Consumos de Energia Primária e Final (adaptado DGEG (2015))

A tendência registada no âmbito da energia primária foi acompanhado pelo consumo da energia final, tendo-se registado um decréscimo progressivo desde 2005 até ao ano de 2012.

Acompanhando este cenário, e no sentido da concretização do Programa do Governo e das Grandes Opções do Plano para 2013, aprovadas em 31 de Dezembro pela Lei nº 66-A/2012, o governo pretende prosseguir os objetivos relacionados com a continuidade das medidas que garantam o desenvolvimento do modelo energético com racionalidade económica e assegurar a melhoria da eficiência energética do país através da execução de planos como o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e a Estratégia Nacional para a Energia com o horizonte 2020 (ENE 2020). Segundo a diretiva n.º 2006/32/CE, de 5 de abril de 2006, emitida pelo Parlamento Europeu relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos, é exigido aos estados-membros que tenham como metas, até 2016, um objetivo de economias de energia de 9% através da promoção de medidas de eficiência energética. As estimativas de poupança induzida pelo PNAEE até 2016 são de 1.501 ktep, correspondente a uma redução do consumo energético de aproximadamente 8,2% relativamente à média de consumo verificada entre 2001 e 2005, aproximando-se assim do objetivo estabelecido pelo União Europeia (9%).

De forma a colocar no mesmo plano o desenvolvimento económico e a energia consumida, é utilizado o indicador da intensidade energética, que relaciona os consumos energéticos de um determinado país face à riqueza gerada. Na figura seguinte é apresentada a comparação da evolução da intensidade energética entre os conjunto dos países da União Europeia e Portugal para o período compreendido entre 2005 e 2013.

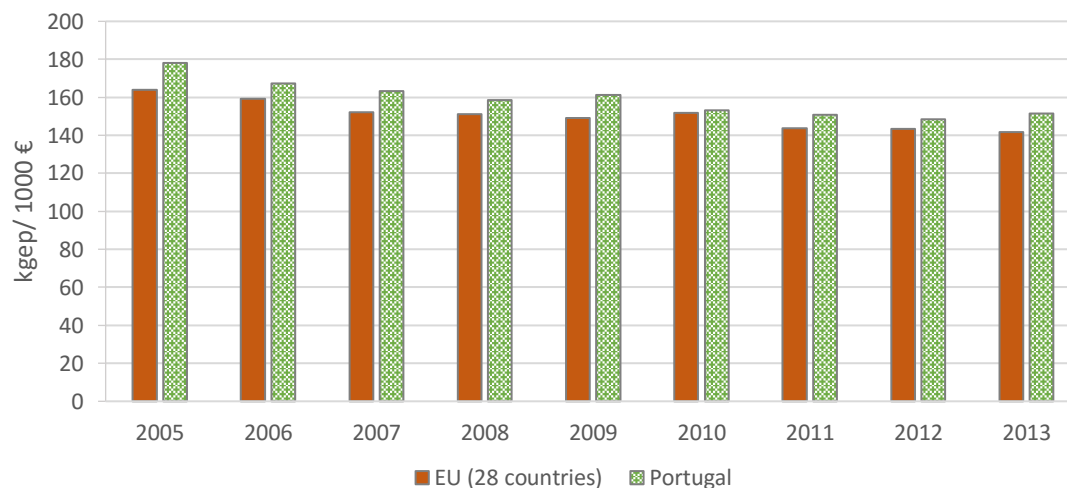


Figura 3.3 - Evolução da intensidade energética da generalidade dos países da UE e de Portugal – Energia Primária (kgep/1000€) (Eurostat, 2015)

A figura anterior revela uma redução progressiva da intensidade energética da energia primária em Portugal, e que se encontra em linha com a média da UE. Contudo, a boa prestação de Portugal em termos da intensidade energética da energia primária não evidencia o resultado menos positivo quando é abordada a intensidade energética da energia final. Segundo a RCM nº20/2013, de 10 de Abril, a intensidade energética da energia final é 27% inferior à média da UE. Desta forma, é evidenciado um problema de competitividade da economia nacional o que vem reforçar a necessidade de aumento de esforços na atuação direta sobre a energia final, no âmbito do PNAEE.

De seguida são representados os consumos de energia final por setor de atividade para o período compreendido entre 2005 e 2012, assim como as poupanças alcançadas no âmbito do PNAEE 2016.

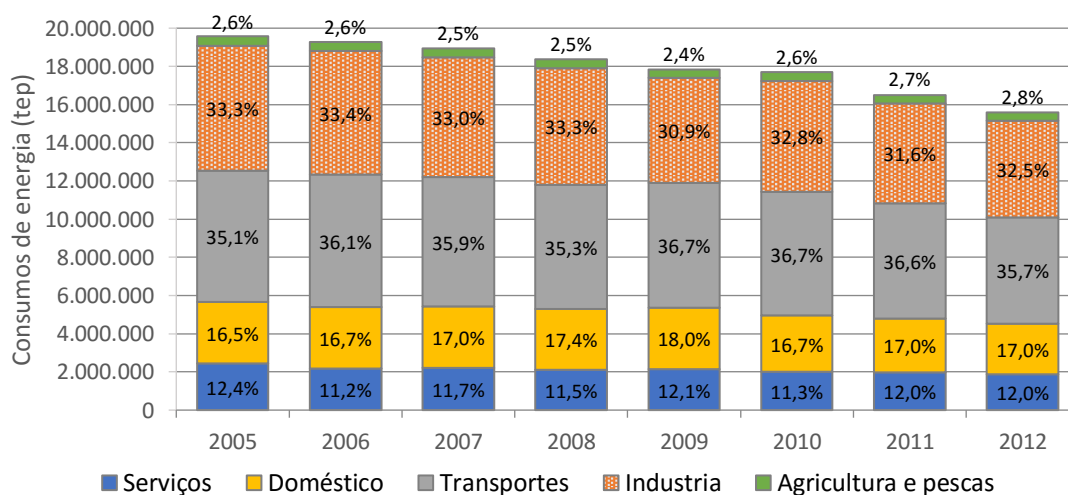


Figura 3.4 - Consumo de energia final por setor de atividade (DGEG)

Na figura anterior é visível a grande percentagem de consumos associados ao setor industrial, bem como a sua evolução ao longo do período em causa. Nos últimos anos, este setor, variou o seu consumo entre os 30,9% e os 33,4% do consumo de energia final do país. A contribuir para o aumento da eficiência energética está a adesão, por parte das várias entidades, ao sistema de eficiência energética na indústria. Neste sistema insere-se o Sistema de Gestão dos Consumos

Intensivos de Energia (SGCIE), regulado pelo Decreto-Lei nº71/2008, cujo foco consiste na promoção da eficiência energética na área da indústria e na promoção da monitorização dos consumos energéticos das instalações consumidoras intensivas de energia (CIE).

Na Tabela 3.1 apresentam-se as estimativas de poupanças induzidas pelo PNAEE para 2016 e 2020, bem como a execução conseguida.

Tabela 3.1 – Resumo das poupanças totais alcançadas com o PNAEE (PNAEE 2016, Resolução do Conselho de Ministros nº20/2013, de 10 de Abril)

Área	Energia poupada (tep)		Meta 2016 (tep)		Execução em relação à meta de 2016 (%) ¹	Meta 2020 (tep)		Execução em relação à meta de 2020 (%) ²
	Final	Primária	Final	Primária		Final	Primária	
Transportes	252.959	252.959	344.038	343.683	74	408.414	406.815	54
Residencial e Serviços	267.008	371.147	634.265	836.277	42	857.493	1.098.072	34
Indústria	177.895	179.812	365.309	377.221	49	471.309	521.309	34
Estado	9.902	14.190	106.380	153.634	9	205.425	295.452	5
Comportamentos	21.313	32.416	21.313	32.416	100	21.313	32.416	100
Total PNAEE	729.007	850.524	1.501.305	1.773.231	49	2.003.954	2.394.064	36

¹ Face à energia final

² Face à energia primária

Da análise à tabela acima representada conclui-se que, atualmente, a poupança induzida pelo PNAEE representa cerca de 49% da poupança estabelecida para 2016 no conjunto dos sectores. O setor industrial revela-se uma parcela importante no cumprimento do objetivo estabelecido, uma vez que já representa cerca de 11,9% das metas previstas (energia final) dos 24% estabelecidos no âmbito do atual PNAEE (2016).

Como referido anteriormente, parte das reduções espelhadas, na Figura 3.4 e na Tabela 3.1, devem-se à introdução de medidas de eficiência energética. A estas medidas associam-se instrumentos que permitem a obtenção de um maior grau de controlo da utilização da energia, tais como sistemas de gestão e monitorização de energia, que são fundamentais para a obtenção de informação pertinente contribuindo assim, de forma preponderante, para o desenvolvimento de medidas de eficiência energética.

Inserido na área industrial, o setor do tratamento de águas residuais tem procurado controlar e usar este tipo de informação de forma a atingir uma melhoria contínua do desempenho energético das infraestruturas responsáveis pelo tratamento de águas residuais (ETAR).

Nos últimos anos, tem-se assistido a um crescimento do número de ETAR, em consequência das exigentes metas impostas pela União Europeia em matéria de qualidade das águas. Segundo o Eurostat (2015), há uma tendência de aumento na interligação da população aos sistemas de tratamento de águas residuais, tal como pode ser observado pela análise à tabela seguinte.

Tabela 3.2 – População com interligação à rede de tratamento de águas residuais (%) (Eurostat, 2015)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Bélgica	88,5	:	:	:	:	:
Bulgária	70,4	70,6	74,1	74,3	74,7	:
Republica Checa	81,1	82,3	83,3	83	84,7	:
Dinamarca	89,7	90,3	90,7	90,7	90,8	:
Alemanha	:	97,3	:	:	:	:
Estónia	81	81,6	82,2	82,7	82,4	:
Irlanda	:	:	:	:	:	:
Grécia	87,3	87,3	88,1	92	:	:
Espanha	:	98	:	99,1	:	:
França	:	:	81,5	81,5	81,5	:
Croácia	:	:	53	:	:	:
Itália	94	:	:	:	:	:
Chipre	:	:	:	:	:	:
Letónia	66,5	64,3	67,8	70,8	71,1	:
Lituânia	:	:	:	74,1	:	:
Luxemburgo	:	97,1	99	99	99	:
Hungria	72	72,3	72,8	74	75	:
Malta	100	100	100	100	100	:
Holanda	:	99,4	:	99,4	:	:
Áustria	:	93,9	:	94,5	:	:
Polónia	61,5	62	63,5	64,3	65,1	:
Portugal	81,3	:	:	:	:	:
Roménia	29,1	43,5	43,5	44,2	46,8	47,1
Eslovénia	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	:
Eslováquia	59,5	60,4	61,6	62,4	63,6	64,7
Finlândia	:	83	83	83	83	:
Suécia	86	86	86	87	87	:
Reino Unido	97	97,3	:	:	:	:

Analisando a totalidade dos estados membros da União Europeia (UE), é de realçar que 14 possuíram uma percentagem populacional de interligação à rede de tratamento igual ou superior a 80%. Alguns países, como o Reino Unido, Alemanha, Dinamarca, Espanha, Malta ou Luxemburgo, já excedem os 90% (Eurostat, 2015).

Apesar de não vir referenciado na tabela anterior, o valor de Portugal para o ano de 2011, segundo o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais 2020, manteve-se próximo dos 80%. (PENSAAR 2020, 2014). Este valor, apesar de bastante satisfatório, ficou aquém do estabelecido no Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR) definido para o período compreendido entre 2007 e 2013. Neste âmbito, o objetivo definido pelo PEAASAR consistia em servir cerca de 90% da população total do país com sistemas públicos de saneamento de águas residuais urbanas. Ainda que não atingida a meta inicialmente proposta, mas acompanhando o cenário atual na UE, prevê-se que exista um aumento deste indicador impulsionado pela necessidade do cumprimento do normativo e pela melhoria da qualidade das massas de água. A percentagem necessária ($\approx 10\%$) ao cumprimento da meta estabelecida no âmbito do PEAASAR levará a que tenha de ser aumentada a capacidade de tratamento existente, acarretando assim aumentos consideráveis das necessidades energéticas nos próximos anos.

O tema energia ganha especial destaque, uma vez que se enquadra no âmbito de alguns dos programas operacionais definidos para Portugal e estabelecidos em parceria com a Comissão Europeia. As linhas orientadoras definidas por programas, como o Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (POSEUR), definem linhas estratégicas no âmbito do crescimento sustentável e na utilização eficiente de recursos, contribuindo assim para o incentivo da economia verde e estimulando, desta forma, vários sectores com esta relacionados.

De acordo com o plano “PENSAAR 2020 – Uma nova estratégia para o setor de AA e SAR”, nos sistemas multimunicipais de saneamento de águas residuais, a energia representa a maior parcela de custos, seguindo-se da manutenção e destino final de lamas. Note-se que em Portugal, os consumos de energia elétrica associados aos processos de tratamento de águas residuais e à obtenção de água potável atingem cerca de 500 GWh, sendo responsáveis por 1% do total do consumo nacional de energia elétrica e cerca de 3% do total da indústria. (Serra, 2012)

Na figura seguinte encontra-se discriminado o perfil de gastos diretos dos sistemas multimunicipais de tratamento de águas residuais em Portugal.

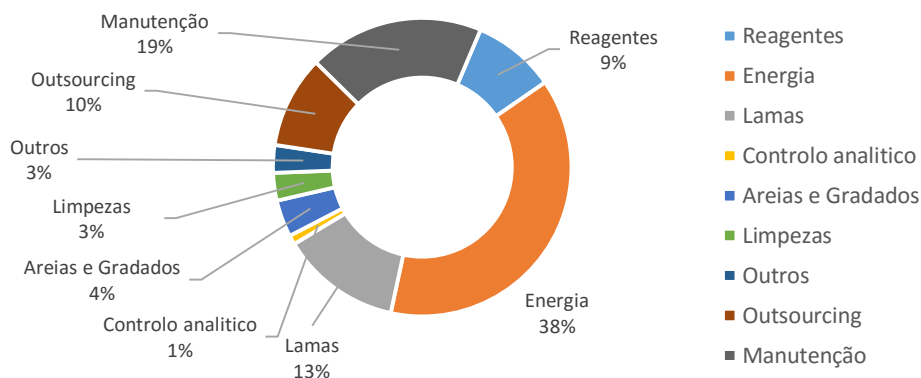


Figura 3.5 - Perfil de gastos diretos nos sistemas municipais de águas residuais (PENSAAR 2020, 2014)

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (Environmental Protection Agency, 2013), os processos de tratamento de águas residuais, juntamente com os processos de tratamento para obtenção de água potável, contribuem com cerca de 4% para o consumo total de energia elétrica nos Estados Unidos da América. De forma global, os custos com a energia afetos a estes processos são responsáveis pelo gasto de cerca de 35% do orçamento destinado à energia dos municípios (NYSERDA, 2008). Estes valores são atingidos, maioritariamente, pelo facto do tratamento das águas residuais ser um processo longo e intensivo, pelas características dos equipamentos utilizados e pelos seus longos períodos de funcionamento, que se revelam essenciais ao processo de tratamento tendo em conta os parâmetros legais existentes.

Desta forma, à medida que o número de ETAR aumenta, os encargos associados à sua gestão tornam-se mais relevantes. Este facto, associado ao aumento do custo da energia leva a que estejam a ser envidados esforços no sentido de tornar este tipo de instalações mais sustentáveis, aumentando o controlo das várias etapas processuais, recorrendo a equipamentos mais eficientes, fazendo comparações com registos históricos existentes e avaliando o seu desempenho energético, uma vez que se revela uma ferramenta útil para a redução de custos.

Neste contexto, têm vindo a ser estudadas inúmeras formas de se aferir a eficiência energética de cada ETAR. Apesar de ser referida a importância da energia no desempenho das instalações, a grande maioria dos estudos têm-se focado na modelação da qualidade da água residual afluente, na avaliação global das instalações e na definição de indicadores que não relacionam as diversas

variáveis existentes. Contudo, esforços terão de ser feitos de forma a interligar os parâmetros de qualidade de água e a eficiência de remoção de poluentes com os aspetos energéticos de forma a aumentar o grau de sustentabilidade do sector, uma vez que o futuro da indústria será fortemente afetada pelos custos da energia. (Descoins, Deleris, Lestienne, Trouvé, & Marechal, 2010).

4. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são abordadas as questões relacionadas com a proveniência do afluente e as características da sua carga poluente, bem como as etapas essenciais ao tratamento de águas residuais. São ainda evidenciadas as características inerentes a cada um dos processos de tratamento, descrevendo os seus principais equipamentos, regimes de funcionamento e perfis de carga típicos de cada um, bem como questões relacionadas com a contribuição de cada processo na globalidade dos consumos de uma ETAR, revelando-se essenciais na compreensão e avaliação das condições de uso e consumo de energia da cadeia de tratamento das águas residuais.

4.1 Análise Contextual

O desenvolvimento da atividade humana tem provocado “desvios” ao ciclo hidrológico cujos impactos têm vindo a assumir uma crescente relevância. Neste contexto surgiu a necessidade de redefinir um conceito que caracterizasse o “novo” percurso da água, denominado por “ciclo urbano da água”.

Este ciclo está associado a vários processos que permitem que o recurso que chega às populações seja utilizado e tratado de forma conveniente, de modo a que seja descarregado no meio ambiente respeitando os requisitos de qualidade.

De uma forma geral, o ciclo urbano da água inicia-se com a captação da água, quer superficialmente ou em profundidade, passando por estações de tratamento (ETA) que controlam a sua qualidade, de forma a garantir a segurança dos utilizadores da rede de abastecimento, nomeadamente em zonas habitacionais, de serviços e indústria. Em resultado da utilização do recurso resultam águas residuais que podem ser classificadas como domésticas ou industriais, em função do respetivo uso. A fase final deste ciclo consiste no tratamento físico, químico e biológica das águas residuais nas estações de tratamento de águas residuais (ETAR), com vista à reposição dos parâmetros iniciais de qualidade, de forma a garantir uma redução da perturbação do meio recetor. Na figura 4.1 ilustram-se as etapas gerais do ciclo urbano da água desde a captação até à descarga no meio ambiente.

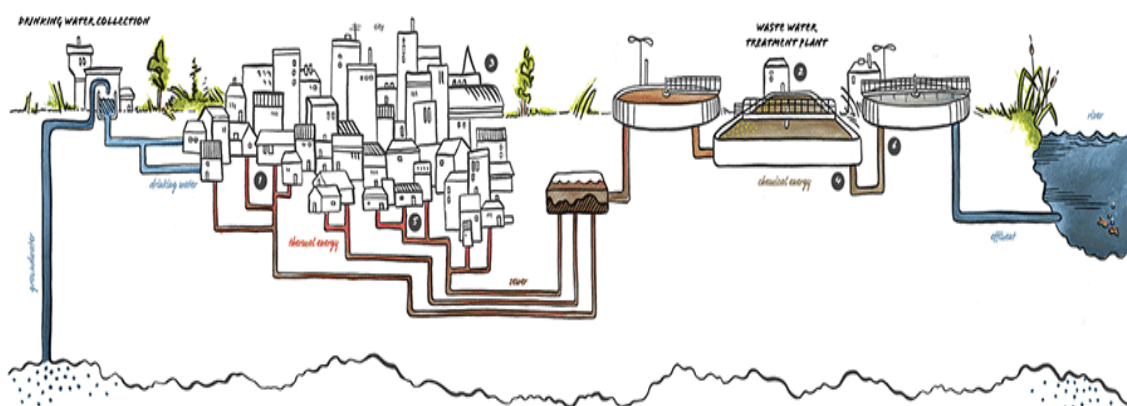


Figura 4.1 - Ciclo urbano da água (INNERS, n.d)

A poluição existente nos efluentes residuais varia em função da sua utilização, podendo ter várias proveniências, tais como as descargas efetuadas pela utilização doméstica e industrial

mas também pelas águas pluviais. Estas utilizações provocam modificações das propriedades naturais da água, o que a torna imprópria para consumo ou para outro tipo de aplicações que exijam determinados parâmetros de qualidade da mesma. Realça-se a existência de uma grande variedade e formas de poluição que variam consoante a origem da sua descarga.

Numa análise global, os tipos de poluição podem ser agrupados em quatro grandes grupos, nomeadamente: poluição física; química; bioquímica; e poluição por organismos patogénicos. (Di Berardino, 2001)

A poluição física tem origem, numa forma geral, nos materiais em suspensão das mais variadas composições, tais como minerais, argilas ou compostos orgânicos. Por sua vez, este tipo de poluição provoca alterações na água, ao nível da cor, depósito de sedimentos e também nas suas propriedades naturais tais como a densidade e a viscosidade do fluido.

No que toca à poluição química, pode afirmar-se que é proveniente, em grande parte, de atividades de cariz industrial mas também de escorrências de terrenos agrícolas ou da exploração de minérios. Destas alterações podem resultar algumas perturbações nos meios recetores que resultam na turvação de águas, à corrosão de estruturas hidráulicas, à alteração da vida biológica provocada pela variação do potencial *redox*.

O tipo de poluição mais preocupante, tanto ao nível do tratamento como da descarga no meio recetor, diz respeito à poluição bioquímica. Esta é gerada pelas excreções humanas e animais mas também pelos resíduos provenientes da indústria alimentar tornando-se bastante preocupante dado que, em termos quantitativos, são depositadas enormes quantidades deste tipo de matéria orgânica. No afluente “contaminado” com este tipo de poluição ocorrem uma série de reações biológicas de decomposição que originam alterações na cor, turvação e redução do O₂ existente no meio recetor, bem como a libertação de azoto e fósforo que poderá servir de estímulo para a proliferação de plantas e vegetação.

Quanto à poluição por organismos patogénicos, tem origem em contaminações pelo lançamento de esgotos de origem humana contendo matéria fecal de indivíduos portadores de doenças e exige um controlo acrescido com vista à promoção da saúde pública evitando assim o desenvolvimento de agentes patogénicos, tais como bactérias e protozoários de origem intestinal.

De forma a simplificar o desenvolvimento de trabalho dos profissionais associados ao tratamento de efluentes foram definidos alguns parâmetros de caracterização da qualidade das águas residuais. Este tipo de parâmetros são pouco específicos sobre o tipo de compostos presentes mas avaliam de forma razoável a carga poluidora, permitem prever os impactos causados no meio recetor e viabilizam o controlo processual (operação das instalações em função das variáveis de carga)

Para efeitos de avaliação da quantidade de matéria sólida é utilizado um parâmetro que indica a quantidade total de partículas que podem ser removidas através de operações de filtragem denominado por Sólidos Suspensos Totais (S.S.T.).

Relativamente às características químicas da amostra, os parâmetros utilizados são a Carência Química de Oxigénio (C.Q.O.) e a Carência Bioquímica de Oxigénio (C.B.O.). O primeiro indica a quantidade de oxigénio necessária para oxidar, com produtos químicos, os compostos orgânicos, enquanto que o segundo permite aferir a quantidade de oxigénio dissolvido utilizado por micro-organismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica. (Metcalf & Eddy, 1997)

O CQO é utilizado para medir a quantidade de matéria orgânica tanto das águas residuais como da generalidade dos recursos hídricos. Por outro lado, o CBO é utilizado na aferição da

qualidade tanto do afluente como do efluente e tem vindo a ser utilizado para os seguintes propósitos:

- Determinação da quantidade aproximada de oxigénio necessária para a estabilização da matéria orgânica;
- Dimensionamento de estações de tratamento de água;
- Aferição da eficiência de tratamento de processos;
- Verificação dos limites legais de descarga.

Comparando estes dois parâmetros (CQO e CBO) revela-se de extrema importância realçar que os valores de CQO são, geralmente, mais elevados que os de CBO visto que existem mais compostos que são quimicamente oxidados do que os que podem ser biologicamente degradados. Em determinadas amostras de águas residuais é possível proceder a uma correlação entre os valores destes dois parâmetros, o que pode ser bastante útil visto que a brevidade com que o teste de CQO pode ser feito (3 horas) é muito inferior ao período de 5 dias necessário para o CBO. (Metcalf & Eddy, 1997)

É importante referir a existência de outros parâmetros de avaliação do efluente tais como Sólidos Totais (S.T), Sólidos Voláteis (S.V.), Sólidos Suspensos Voláteis (S.S.V) e pH.

Note-se que os limites máximos dos parâmetros em análise devem respeitar as exigências presentes no Decreto-Lei nº152/97 que regula as normas de qualidade a que as águas residuais, em função dos usos, devem obedecer. Estes parâmetros estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros de qualidade da água (Decreto-Lei nº 152/97)

Parâmetro	Concentração	Percentagem mínima de redução ¹
Carência bioquímica de oxigénio (CBO ₅ a 20 °C) sem nitrificação	25 mg/l O ₂	70-90%
Carência química de oxigénio (CQO)	125 mg/l O ₂	75%
Total de partículas sólidas em suspensão	35 mg/l O ₂	90%

¹ Redução em relação à carga do afluente

Destaca-se ainda a existência de instalações que em virtude da sua localização (meio sensível) estão sujeitas a maiores obrigações no que à qualidade do efluente tratado diz respeito, levando a que seja necessário um aumento do grau de tratamento e o controlo de parâmetros, tais como o fósforo total e o azoto total.

As diferentes exigências ao nível do tratamento dos afluentes, em função do meio em que se encontram, e das diferentes concentrações de cargas poluentes à chegada às ETAR leva a que tenham de ser adotadas diferentes fases e processos de tratamento, de forma a respeitar os requisitos mínimos de qualidade de descarga em meio ambiente. Esta diversidade leva a que existam diferenças nas necessidades energéticas que cada um dos processos tem nas instalações em que se encontram inserido, assim como na forma como o seu controlo é efetuado.

4.2 Uso e Consumo de Energia nas Fases e Processos de Tratamento

Os processos de tratamento de águas residuais são formados por uma série de operações unitárias com vista à remoção de substâncias indesejáveis presentes no afluente. Estas operações podem dividir-se em categorias que variam consoante a sua ordem e a sua função no processo de

tratamento. De uma forma geral, as etapas de tratamento dividem-se em tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário, tratamento terciário e tratamento de lamas (Sperling & Chernicharo, 2005). Nos pontos subsequentes aborda-se com maior detalhe cada uma das etapas em causa, assim como o perfil de consumos típicos de alguns órgãos afetos a cada uma.

Na figura 3.2 estão representadas as etapas processuais típicas do tratamento de águas residuais presentes numa ETAR com tratamento por lamas ativadas.

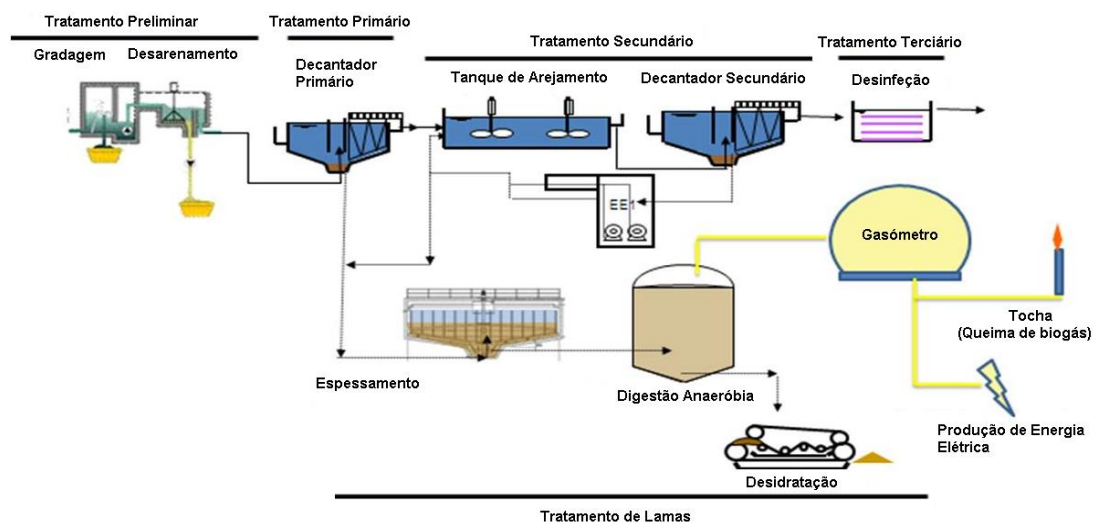


Figura 4.2 - Esquema típico do processo de tratamento de uma ETAR (adaptado de Simarsul)

4.2.1 Tratamento Preliminar

O tratamento preliminar consiste no tratamento feito ao aflente acabado de chegar à ETAR, de forma a retirar grande parte dos sólidos mais grosseiros, gorduras e areias através de vários subprocessos, impedindo assim a degradação mais rápida dos equipamentos que se encontram a jusante, propiciando condições para que se iniciem as etapas de tratamento seguintes. Os subprocessos presentes no tratamento preliminar são: gradagem, desarenamento e desengorduramento.

A gradagem consiste na utilização de grelhas movidas por motores elétricos que são atravessadas pelo volume de aflente a tratar, permitindo a recolha dos resíduos de maiores dimensões para, posteriormente, serem armazenados em contentores.

Os consumos de energia afetos ao tratamento preliminar, não se revelam muito relevantes no panorama geral das ETAR, representando cerca de 5% dos consumos totais de energia. Esta questão resulta do facto dos motores associados a este processo, apesar de funcionarem de forma ininterrupta, terem potências relativamente reduzidas.

Após a gradagem, surge o processo que tem como objetivo a remoção das areias presentes no aflente – Desarenamento. A remoção das areias pode ser efetuada por equipamentos segundo vários princípios. O mais comum é o da sedimentação, na qual o aflente é direcionado para um tanque onde a velocidade de escoamento é mantida baixa e, por gravidade, as partículas de areia sedimentam para posterior recolha.

A última etapa do tratamento preliminar consiste na remoção de gorduras existentes no aflente a tratar - Desengorduramento. Para tal, são utilizados compressores que injetam ar nos

tanques, favorecendo a formação e flutuação de flocos de gordura, facilitando os processos subsequentes. O sistema em causa acarreta elevados benefícios para o desempenho geral da ETAR, uma vez que evita o crescimento de bactérias anaeróbias impedindo a formação de odores desagradáveis nas imediações da instalação (Di Bernardino, 2001).

É usual os processos de desarenamento e desengorduramento serem efetuados no mesmo órgão, onde se efetua a injeção longitudinal de ar no fundo, de modo a criar um movimento em espiral, proporcionando o controlo da velocidade e, conseqüentemente, da remoção de grande parte das areias e gorduras. Estas etapas assumem especial importância, uma vez que permite reduzir o desgaste dos equipamentos mecânicos e evitam a obstrução progressiva dos órgãos a jusante (Simarsul, 2013). Estes processos envolvem habitualmente a utilização de compressores de ar cujo seu regime de funcionamento é estabelecido através da definição dos tempos de arranque e paragem. A título ilustrativo apresenta-se na figura 4.3 os diagramas de carga relativos a uma instalação com capacidade de tratamento de 2.200 m³/dia e a um compressor responsável pelo processo em causa.

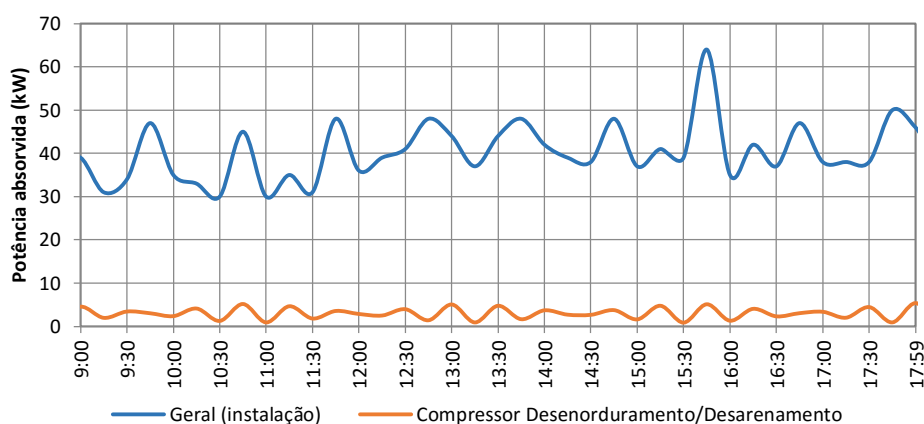


Figura 4.3 - Diagrama de carga do compressor do processo de Desarenamento e Desengorduramento (Schneider Electric, 2015)

O compressor utilizado no processo em causa possui um regime de funcionamento que intercala 14 minutos de funcionamento, seguido de 12 minutos de paragem, resultando num tempo total de operação que atinge as 5.110 horas anuais. O equipamento em causa representa cerca de 4,4% do total da potência instalada na ETAR e contribui com cerca de 7,5% (28.334 kWh/ano) dos consumos anuais de energia.

O seu período de funcionamento é estabelecido tendo em conta as necessidades de ar no interior do desarenador, de forma a produzir um efeito de *air-lift* promovendo a recolha de gorduras e escumas à superfície, para posterior recolha através dos raspadores de gorduras.

4.2.2 Tratamento Primário

No tratamento primário é utilizado o processo de decantação que consiste no encaminhamento das águas residuais, provenientes dos tratamentos preliminares, para um decantador. Neste, são separados os sólidos em suspensão do afluente bruto através da permanência durante um período de tempo necessário para que haja a deposição de uma grande parte das partículas, formando assim uma camada de lamas no fundo do decantador. Após a deposição das lamas, a saída da água tratada efetua-se ao longo do perímetro onde está colocada uma lâmina com pequenos rasgos que permite a filtragem de qualquer impureza que não tenha decantado. Na figura seguinte ilustra-se

o esquema interior de um decantador típico deste tipo de instalações onde estão representados alguns órgãos.

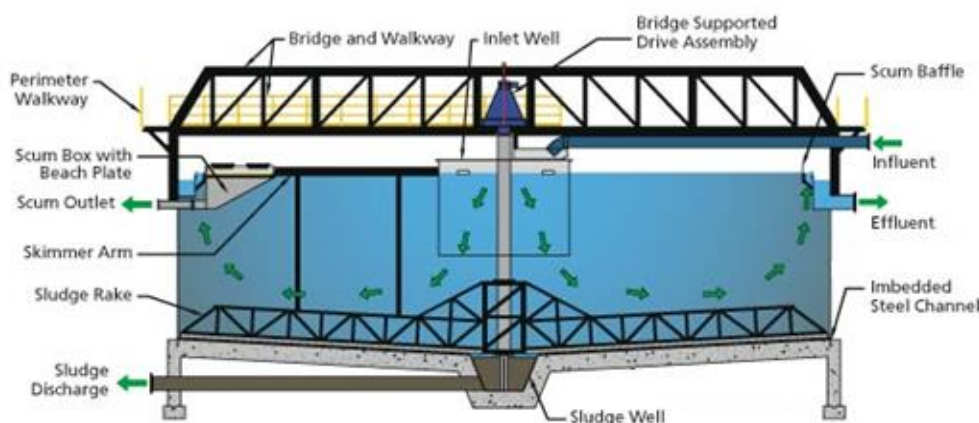


Figura 4.4 - Esquema interior de um decantador (Monroe Environmental, 2015)

A remoção das lamas no fundo do decantador, pode ser efetuada através de um sistema de raspagem mecânica que circula em volta do tanque direcionando-as para um poço ou através de mecanismos de aspiração que evitam a acumulação de uma camada de elevada espessura. O facto de existirem gorduras presentes no afluente a tratar permite que, neste processo, se formem compostos flutuantes (partículas flotadas) que podem ser recolhidos através de uma antepara superficial encarregue de os direccionar para outro local.

Do ponto de vista energético, este processo comporta tipicamente dois equipamentos eletromecânicos, a ponte raspadora e a bomba de aspiração de lamas. A ponte raspadora envolve habitualmente a utilização de um motor de potência relativamente reduzida, com um regime de funcionamento em contínuo (24h), mas que não comporta um peso significativo para o consumo final de energia das instalações, situando-se habitualmente abaixo dos 2% do total consumido pela instalação.

Quanto à aspiração de lamas depositadas no fundo do decantador, esta é efetuada por bombas que as direccionam para um tanque de lamas, cujas características variam em função do tipo de instalação. Habitualmente a potência eléctrica instalada neste equipamento representa cerca de 2% da potência total instalada numa ETAR e o seu regime de funcionamento é variável, sendo muitas vezes operadas em função do nível de lamas no tanque. De forma a otimizar o processo e com o objetivo de preservar as suas condições de operação são utilizados, por vezes, variadores eletrónicos de velocidade (VEV) que permitem reduzir o número total de arranques e paragens dos equipamentos.

A introdução da decantação primária no processo de tratamento de águas residuais permite economias de energia na instalação, uma vez que retira parte considerável da carga orgânica no afluente (Silva & Rosa, 2015). Desta forma, a quantidade de carga orgânica direccionada para o tratamento biológico é reduzida, permitindo uma redução dos níveis de arejamento dos tanques de arejamento.

4.2.3 Tratamento Secundário ou Biológico

Nesta etapa do processo de tratamento de águas residuais dá-se início ao processo biológico (aeróbio ou anaeróbio). Neste tipo de processos, a base de funcionamento consiste no desenvolvimento de bactérias que se alimentam de matéria orgânica e outros nutrientes, originando produtos que irão variar de acordo com as espécies que os degradam.

De uma forma geral, a assimilação de matéria orgânica nos processos biológicos pode ser dividida em duas fases responsáveis pela sua degradação, denominadas por fase de oxidação e a fase de auto oxidação. Na fase de oxidação ocorre a dissolução da matéria orgânica e respetiva utilização por parte das bactérias com vista ao seu crescimento. Por outro lado, a fase de auto oxidação consiste na morte das bactérias e à utilização deste material por outras populações celulares, em crescimento, que produzirão outros produtos finais, de uma forma geral, mais estáveis. (Di Bernardino, 2001)

No esquema seguinte, são referenciados os tipos de processos aeróbios utilizados na oxidação da matéria orgânica.

Tabela 4.2 - Processos de Oxidação Aeróbia

Oxidação Aeróbia
Lamas Ativadas
Leito Percolador
Discos Biológicos
Biofiltros Ativados
Lagoas Arejadas
Lagoas de Maturação
Lagoas Arejadas
Lagoas Facultativas
Lagoas Fotossintéticas
Lagoas de Macrófitas

Apesar de estarem representados na tabela anterior vários processos de oxidação, é de realçar o facto de, neste documento, apenas ser abordado em profundidade o tratamento por lamas ativadas, uma vez que é um tratamento comum a todas as instalações analisadas.

O processo de lamas ativadas é constituído por um tanque de arejamento onde crescem e desenvolvem-se culturas de bactérias aeróbias. Neste sistema existe a necessidade de garantir a existência de um ambiente aeróbio de forma a possibilitar condições de desenvolvimento às bactérias ali existentes. Estas condições são garantidas através de arejadores (arejamento mecânico) ou compressores (arejamento por ar difuso) que permitem introduzir uma determinada quantidade de oxigénio no interior do tanque. O funcionamento dos sistemas de arejamento tem como objetivo a mistura da totalidade do afluente do tanque e o fornecimento de oxigénio necessária para que ocorra o desenvolvimento das bactérias aeróbias, podendo ser operado em função das necessidades do sistema.

Do ponto de vista energético, o arejamento acarreta elevados consumos de energia elétrica para este tipo de instalações. Dependendo do nível de controlo e do tipo de tecnologia (arejamento mecânico ou ar difuso), o processo de arejamento numa instalação com tratamento por lamas ativadas, pode ter um consumo energético que varia entre os 45 e os 60% do total de consumos

elétricos de uma ETAR. (Bolles, n.d).Esta ordem de grandeza é reiterada pelas observações de Catarino & Henriques (2015), que analisando um conjunto de instalações localizadas em Portugal, pôde concluir que 53% dos consumos de energia referem-se ao processo de arejamento. Este facto deve-se às elevadas necessidades de oxigénio que o tanque biológico necessita, bem como aos equipamentos de elevada potência associados a esta etapa.

Do ponto de vista operacional, os equipamentos afetos ao arejamento do tanque biológico podem operar em regimes distintos.

i) Temporizado

Neste modo são definidos tempos de operação e paragem em função do comportamento biológico do tanque. Normalmente, é aferido, previamente, o seu “comportamento” bem como as suas necessidades de oxigénio de forma a otimizar, ainda que de forma limitada, o processo.

Na figura seguinte estão representados os diagramas de carga referentes ao funcionamento de dois arejadores mecânicos, responsáveis pelo arejamento de uma instalação com capacidade de tratamento de 5.200 m³/dia, bem como o consumo geral da instalação.

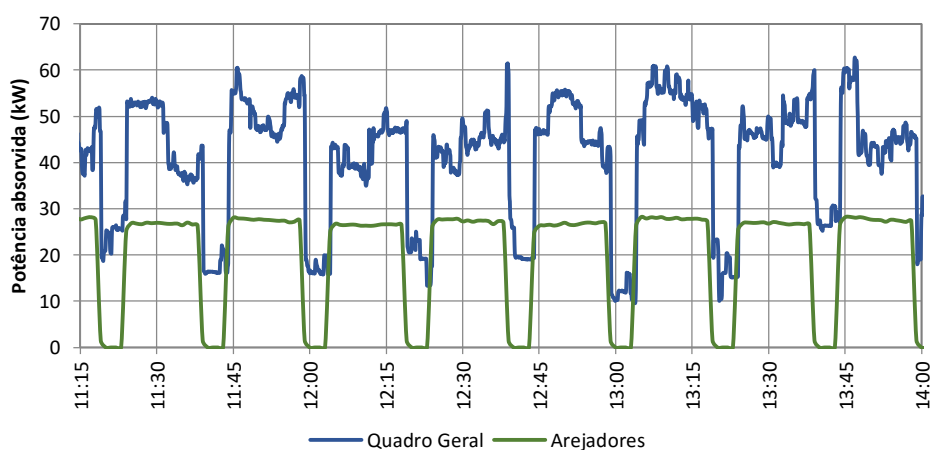


Figura 4.5 - Diagrama de carga do processo de arejamento, em modo temporizado (Schneider Electric, 2015)

O regime de funcionamento dos arejadores ocorre de forma alternada, com intervalos de 15 minutos de operação e 15 de paragem, o que resulta num tempo total de operação próximo das 4.400 horas anuais. Este facto, associado à potência absorvida por estes equipamentos (próxima dos 27 kW) contribui com cerca de 57% para o total dos consumos anuais da ETAR em causa. É importante referir que a potência instalada no processo de arejamento (2 arejadores) representa cerca de 48% do total da potencia instalada nesta ETAR

ii) Sonda de oxigénio dissolvido e/ou potencial *redox*

Os regimes de operação em função de sondas de oxigénio dissolvido e/ou de potencial redox revelam-se bastante mais eficientes, uma vez que fornecem as reais necessidades do tanque de arejamento num determinado momento.

Na figura seguinte, está representado o diagrama de carga de dois compressores de arejamento, dimensionados para uma instalação com capacidade de tratamento de 19.300 m³/dia e que opera em função do potencial *redox*, medido em contínuo, no tanque biológico.

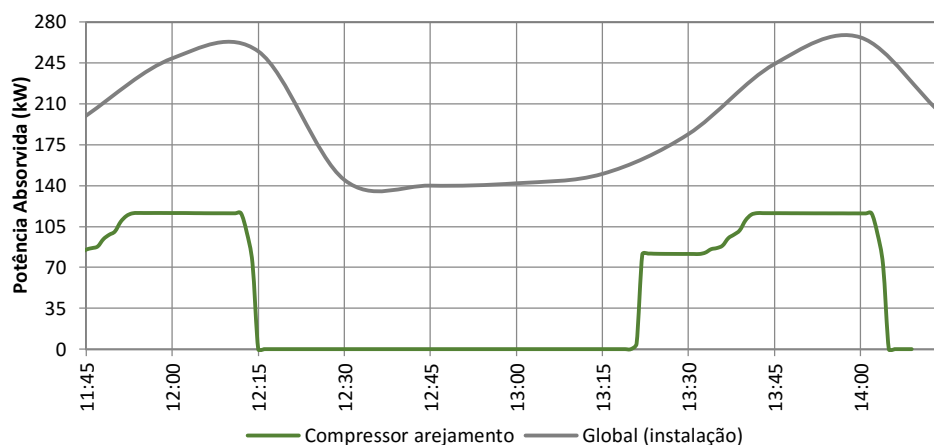


Figura 4.6 - Diagrama de carga do processo de arejamento, a operar em função do potencial redox (Schneider Electric, 2014)

O processo de arejamento da instalação em causa possui um total de 2 sobrepessores que operam de forma alternada e que, em conjunto, contribuem com cerca de 36% da potência total instalada. Os equipamento monitorizados funcionam em ciclos com uma duração aproximada de 45 minutos, seguindo-se um período de paragem de cerca de 1 hora, absorvendo uma potência média próxima dos 99,5 kW. Anualmente, o conjunto dos equipamentos opera cerca de 3.700 horas e são responsáveis por cerca de 32% do total dos consumos da instalação.

Apesar das diferenças existentes entre os dois sistemas em análise (arejadores verticais e sobrepessores), é possível verificar uma diferença considerável na contribuição que estes equipamentos têm no consumo global das ETAR em análise. Apesar do sistema composto pelos arejadores verticais representar uma percentagem de potência instalada superior em 12% (56% para sistema de arejamento vertical e 48% para sistema com sobrepessores) ao sistema composto pelos sobrepessores, é da maior importância realçar que a percentagem de consumos afetos a cada um destes difere em cerca de 25% (57% sistema com arejadores verticais e 32% para sistema com sobrepessores). Esta diferença é reiterada por Bolles (n.d), que refere que apesar de todas as complicações relacionadas com a manutenção deste tipo de sondas, estas revelam-se extremamente eficazes na redução de consumos desta etapa de tratamento, podendo atingir poupanças compreendidas entre os 20 e os 50% (WERF, 2010).

4.2.4 Tratamento Terciário

A última etapa do processo de tratamento do afluente consiste na desinfecção, usualmente designada por tratamento terciário. Nesta etapa, é fundamental aumentar o grau de purificação proveniente dos processos primário e secundário de forma a não prejudicar o meio recetor aquando da descarga efetuada no mesmo. Desta forma, têm vindo a ser utilizadas algumas técnicas/processos que permitem atingir resultados com um elevado grau de qualidade no que à purificação da água diz respeito, tais como a cloragem, ozonização, lâmpadas ultravioleta (UV), microtamisadores ou, até mesmo, a utilização conjunta de alguns destes processos.

Do ponto de vista energético, a cloragem ou a ozonização apenas necessitam de bombas doseadoras com potências reduzidas, geralmente na ordem dos 100 W, e com um funcionamento esporádico.

Quanto ao tratamento por radiação ultravioleta, as lâmpadas UV operam, tipicamente, num regime bastante estável e de forma interrupta de forma a não reduzir o tempo útil de vida das

lâmpadas e a garantir sempre a purificação do volume total de afluente. O tratamento de desinfecção por lâmpadas UV afeto a uma instalação com uma capacidade de tratamento de 3.325 m³/dia , pode representar cerca de 1% do total da potência instalada de uma ETAR. Anualmente, este equipamento pode operar de forma interrupta (8760h) e ser responsável por cerca de 4% da globalidade dos consumos de energia elétrica da instalação. Esta ordem de grandeza é reiterada pelas observações de Catarino & Henriques (2015), que analisando de forma conjunta 13 instalações, projetadas para volumes de água e equivalentes populacionais bastante distintos, concluíram que o tratamento terciário representa uma percentagem menor que 10% do total de consumos registados.

4.2.5 Tratamento Lamas

O tratamento de lamas provenientes da fase líquida dos processos de tratamento de águas residuais é uma etapa de elevada importância no que toca à necessidade de garantir condições de tratamento e estabilização para que possam ser depositadas no meio ambiente sem que surjam problemas de saúde pública ou ambiental.

A quantidade de lamas produzida nas ETAR depende de algumas variáveis, tais como a concentração de sólidos em suspensão, matéria orgânica e também do sistema de tratamento utilizado. Aqui existem uma série de funções básicas relacionadas com o condicionamento, espessamento, desidratação, estabilização e redução dos sólidos.

No condicionamento de lamas estão presentes vários métodos que permitem facilitar a separação das fases líquida e sólida, e que podem ser classificados como condicionamento químico ou térmico. No condicionamento químico a separação pode ser feita através da adição de polímeros orgânicos ou outras misturas químicas. Quanto ao condicionamento térmico, são criadas condições, através do aumento da temperatura e pressão, que permitem a quebra de ligações entre a água e os sólidos e que geram lamas com melhor capacidade de desidratação do que as condicionadas quimicamente.

Após o condicionamento, existe a necessidade de espessar as lamas de forma a reduzir a maior parte da água presente com vista à redução dos custos de operação dos órgãos de tratamento a jusante. O espessamento pode ser feito através de flotação, que consiste na injeção de ar no sistema a uma pressão elevada (10-20 bar), de modo a que haja a fixação das bolhas aos sólidos presentes nas lamas, possibilitando a sua flutuação até à superfície onde, posteriormente, serão removidos através de um mecanismo raspador. As lamas raspadas da superfície da água ficam sujeitas a mecanismos de desidratação de lamas, tais como, filtros de banda ou bombas centrífugas que permitem atingir um grau de desidratação bastante considerável.

Por último, o processo de estabilização permite a redução da matéria orgânica para que sejam evitadas reações adversas e libertados odores desagradáveis nas imediações das ETAR. O processo de estabilização comporta dois métodos, um do tipo químico, que consiste na adição de cal ou cloro, e outro de carácter biológico, no qual é feita a digestão aeróbia ou anaeróbia da matéria orgânica.

No processo químico, a adição de cal ou cloro tem como objetivo o aumento do pH (10-11) de forma a impedir o desenvolvimento de atividades biológicas, evitando assim o desenvolvimento de microrganismos patogénicos. Este método é de grande simplicidade e não requer equipamentos complexos, o que leva a que seja bastante utilizado.

A digestão aeróbia é um processo de estabilização realizado através de bactérias aeróbias que vão degradando o composto à medida que a transferência de oxigénio é feita. Esta transferência é a

grande condicionante deste processo, uma vez que implica a utilização de mecanismos de arejamento de elevadas potências elétricas que acarretam elevados consumos e encargos energéticos.

A digestão anaeróbia, tal como o nome indica, é um processo em que algumas espécies de bactérias que atuam na ausência de oxigénio degradam a estrutura orgânica dos compostos de forma a possibilitar a sua simplificação. Esta degradação é feita através de processos de oxidação-redução e pode ser resumida em três etapas, sendo elas as fases hidrolítica, acidogénica e metanogénica.

A digestão anaeróbia, com vista à estabilização das lamas produzidas ao longo dos processos da ETAR, tem vindo a ser adotada por várias instalações devido às vantagens que permite, não só naquilo a que se refere à qualidade que confere às lamas produzidas durante as etapas processuais, mas também à possível valorização destas do ponto de vista da produção de biogás.

Apesar das claras vantagens da digestão anaeróbia, esta não pode ser utilizada em todas as instalações sob pena de poder colocar-se em causa a sua viabilidade económica e processual. De seguida são apresentadas algumas vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia.

Tabela 4.3 - Vantagens e Desvantagens da digestão anaeróbia (Di Berardino, 2001)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> -Produção de lamas capazes de fertilizar solos; -Maior controlo de odores e microrganismos patogénicos -Tolerante a elevadas cargas orgânicas; -Baixo consumo energético; -Produção de biogás 	<ul style="list-style-type: none"> -Possível inibição das bactérias devido a alguns compostos; -Lentidão no arranque do processo; -Processo complexo que dificulta a operação da instalação; -Remoção de azoto e fósforo pouco eficaz; -Necessidade de tratamento posterior;

O biogás produzido é rico em metano pelo que poderá ser recuperado e usado como uma fonte de energia, possibilitando uma melhoria significativa do balanço energético da instalação, originando poupanças significativas com os custos com a energia. De uma forma geral, a energia gerada através deste produto resulta da utilização de grupos cogeneradores capazes de produzir energia elétrica e calor, sendo este último resultado do aproveitamento da energia contida nos gases de escape do mesmo.

É importante referir a possibilidade de adição de outros substratos, que não lamas de ETAR, de forma a aumentar a produção de biogás (co-digestão). Estudos realizados em ETAR de alguns países da Comunidade Europeia revelam que, a operar neste regime, a autossuficiência destas instalações pode atingir os 53%, existindo casos em que já foram atingidos os 71,5%, como é o caso da ETAR de Brunsvique, na Alemanha. (I. Bodík, 2011)

Do ponto de vista energético, o tratamento de lamas contribui com elevados consumos para as instalações. De acordo com Xie & Chenwen (2012) e tendo em conta uma amostra representativa de um conjunto de 1856 instalações localizadas na China, o processo de tratamento de lamas pode representar cerca de 8,7% da totalidade de consumos de uma ETAR. Note-se, no entanto, que de acordo com Hamilton & Arzbaecher (2009), o peso deste tratamento nos consumos globais de um conjunto de instalações com tratamento por lamas ativadas poder situar-se próximo dos 25%.

Estão integrados no tratamento de lamas, alguns equipamentos essenciais à preparação das lamas de forma a serem encaminhadas para o seu destino final. Entre os equipamentos em causa, destacam-se os seguintes:

- Bomba centrífuga de desidratação de lamas;

A bomba centrífuga de desidratação permite reduzir a percentagem de água presente nas lamas, reduzindo assim o seu volume e massa e como consequência disso uma redução nos custos de tratamento final das lamas.

Normalmente, este equipamento opera em função do nível do tanque de lamas e a ordem de comando é dada de forma manual, pelos operadores da ETAR. É importante referir que a frequência e o número de horas que este equipamento funciona depende da produção de lamas produzidas pela instalação.

Na figura seguinte está representado o diagrama de carga de uma bomba centrífuga de desidratação de lamas medido em conjunto com o seu motor auxiliar (responsável pela alimentação de lamas da bomba centrífuga), instalados numa ETAR com uma capacidade de tratamento próxima dos 3.300 m³/dia.

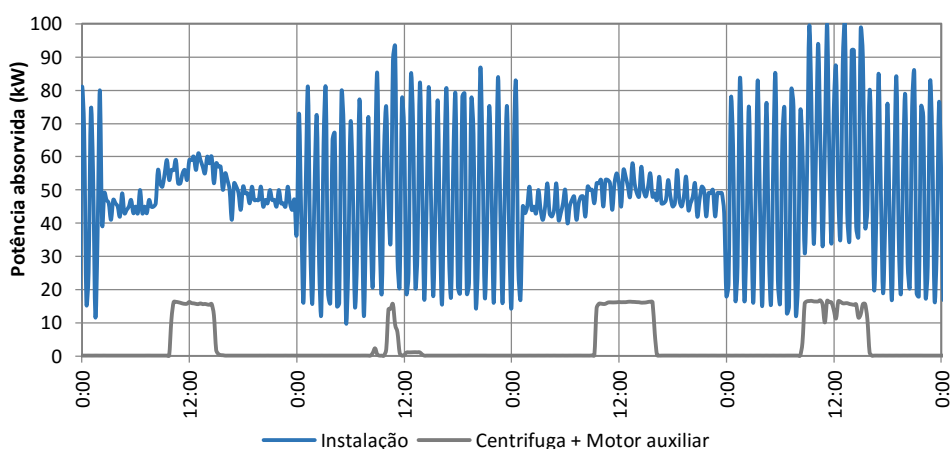


Figura 4.7 - Diagrama de carga de uma bomba centrífuga e respetivo motor auxiliar (Schneider Electric, 2015)

O conjunto de equipamentos (Centrifuga + motor auxiliar) representam, para a ETAR em causa, uma percentagem de cerca de 9% da potência total instalada. Estes equipamentos operam cerca de 1.300 horas anuais a uma potência média de 15,7 kW representando, cerca de 4,8% dos consumos globais da instalação.

- Filtro de banda;

O filtro de banda é, tal como a bomba centrífuga de desidratação, um equipamento que permite reduzir o teor de água existente na lama decorrente do processo de tratamento. De uma forma geral, as lamas provenientes do processo de tratamento são direcionadas para as telas do filtro de banda onde são depositadas e submetidas a pressões elevadas por rolos instalados para o efeito. Em consequência do aumento de pressão provocado pelos rolos e da existência de poros nas telas, a água presente nas lamas é progressivamente libertada.

Apesar de se revelar um processo bastante simples, o seu desempenho na desidratação da lama pode ser afetado por algumas variáveis, tais como: Características da lama; químicos utilizados; pressões aplicadas; porosidade das telas e velocidade de passagens da lamas nas zonas de pressão elevadas (Metcalf & Eddy, 1997).

É importante referir que, quando comparado com a bomba centrífuga de desidratação de lamas, a capacidade (caudal) de tratamento de lamas é consideravelmente mais baixa, o que pode resultar na necessidade de prolongamento do tempo de operação.

Na figura seguinte está representado um diagrama de carga relativo a um filtro de banda instalado numa ETAR com uma capacidade de tratamento de cerca de 5.800 m³/dia.



Figura 4.8 - Diagrama de carga filtro de banda (Schneider Eléctric, 2014)

A par do que sucede na desidratação através da bomba centrífuga, o regime de funcionamento do filtro de banda ocorre em função das necessidades de desidratação da ETAR. Um equipamento deste género, dimensionado para a referida instalação pode funcionar durante 5.300 horas anuais e contribuir com cerca de 6,4% do total dos seus consumos. Note-se que, na globalidade desta instalação, este equipamento é responsável por cerca de 5% da potência total instalada.

- Bomba de lamas desidratadas

A bomba de lamas desidratadas está normalmente localizada após os mecanismos de desidratação (Centrífuga ou Filtro de banda) e tem como principal função o envio das lamas para um silo para, posteriormente, serem encaminhadas para destino final.

Tendo em conta o facto do processo de desidratação ser efetuado em função das necessidades de cada instalação e de forma a racionalizar energia, este tipo de equipamento pode operar ao mesmo tempo do mecanismo responsável pela desidratação da lama da ETAR, ou em função do nível de lamas desidratadas de um depósito localizado a jusante do mesmo.

Este tipo de equipamento, instalado numa ETAR cuja capacidade de tratamento situa-se perto dos 2.185 m³/dia poderá representar cerca de 6% da potência total instalada e ser responsável por cerca de 1% da globalidade dos seus consumos eléctricos.

- Bomba de recirculação de lamas

Este tipo de equipamentos é responsável pela recirculação de lamas provenientes da decantação secundária, usualmente denominadas por lamas secundárias, para o tanque biológico de forma a

manter a relação estabelecida entre a matéria orgânica utilizada pelos microrganismos e a quantidade de sólidos em suspensão no tanque de arejamento.

Na figura seguinte é apresentado o diagrama de carga de uma bomba de recirculação de lamas instalada numa ETAR com uma capacidade de tratamento de 2.200 m³/dia e com processo de lamas ativadas.

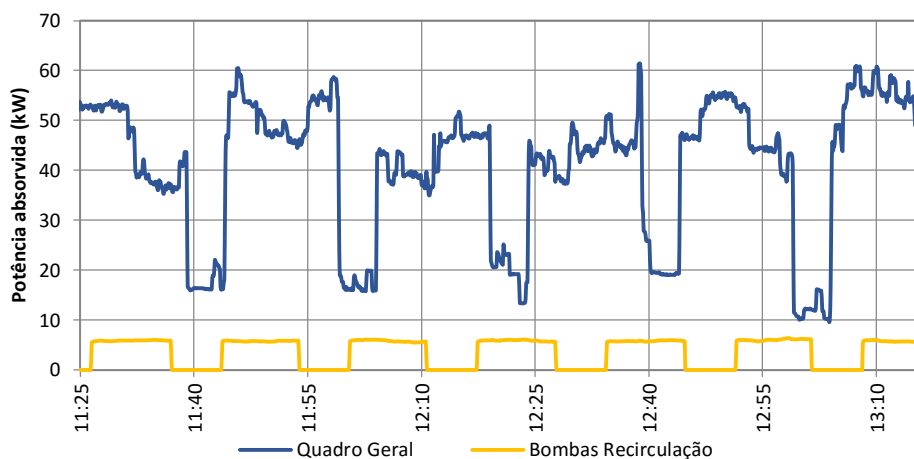


Figura 4.9 - Diagrama de carga de uma bomba de recirculação de lamas (Schneider Electric, 2015)

Da análise à figura anterior é visível um regime de funcionamento típico deste tipo de equipamentos, quando operado de forma temporizada. Note-se que, muitas vezes, este tipo de equipamento encontra-se a operar com variação eletrónica de velocidade em função do nível de lamas decantadas contribuindo para a obtenção de algumas poupanças energéticas.

Nesta instalação, este equipamento é responsável por 2,5% da totalidade da potência instalada na instalação e opera cerca de 6.200 horas anuais. Do ponto de vista dos consumos de energia, a bomba de recirculação de lamas pode representar, numa instalação desta dimensão, cerca de 7,7% dos consumos.

4.2.6 Tratamento do Ar

O “processo de tratamento do ar” consiste na extração do ar proveniente do interior do edifício existente na ETAR que acumula odores resultantes do tratamento das águas afluentes à ETAR. Estes apresentam uma composição que inclui proteínas, hidratos de carbono, óleos e gorduras que depois de degradados através de processos de hidrólise, oxidação ou decomposição microbológica, originam odores. (Almeida de Sousa, 2009)

A produção de odores depende de vários parâmetros, tais como a carga orgânica, o oxigénio dissolvido, processos relacionados com as populações bacterianas e condições de escoamento na rede de drenagem. Gases como o sulfureto de hidrogénio ou o amoníaco são os maiores responsáveis pela formação de odores nas ETAR e podem ter maior incidência em determinados processos de tratamento, tais como na gradagem, decantação e desidratação de lamas. (Almeida de Sousa, 2009)

Atualmente existem dois métodos utilizados habitualmente na remoção de odores das ETAR, sendo eles a desodorização biológica e a desodorização química. Na desodorização biológica ocorrem processos físicos e biológicos que envolvem a transferências de compostos na fase

gasosa para a fase líquida ou sólida e a sua degradação através de micro-organismos fixos a um mecanismo de suporte (p.ex. biofiltros).

O processo de desodorização química baseia-se no contacto entre o ar contaminado pelas substâncias responsáveis pelos odores e as soluções de compostos químicos (ácido sulfúrico e hipoclorito de sódio) capazes de oxidar e neutralizar as mesmas. O ar contaminado é injetado na base de uma torre de desodorização em contracorrente com a solução oxidante, depositada no cimo da torre, levando a que os compostos sejam dissolvidos e oxidados (Águas do Algarve, 2015).

De uma maneira geral, este tipo de processos contemplam ventiladores de potências elevadas e com grandes períodos de funcionamento, uma vez que têm de ser garantidos aspetos importantes relacionados com a segurança dos operadores, preservação das instalações e a não produção de odores nas imediações da ETAR. O seu regime de funcionamento é bastante variável, podendo operar em função de uma tabela de tempo, através da qual são parametrizados períodos de operação e de paragem, ou em função de variáveis (p.e. gás sulfídrico) aferidas através de aparelhos de medição. Nesta última parametrização é comum a utilização de variadores eletrónicos de velocidade (VEV) que permitam variar a frequência de funcionamento dos equipamentos, fazendo com que operem em função das necessidades do processo, ou até mesmo, em modo contínuo mas alterando apenas a frequência de funcionamento dos ventiladores.

Por outro lado, uma vez que o dimensionamento do processo é feito tendo em vista o horizonte de projeto onde as necessidades de tratamento do ar, em virtude do aumento de volume de afluente tratado, são consideravelmente superiores. Tendo em conta as potências elevadas e os longos períodos de operação, a instalação de um VEV torna-se um equipamento bastante útil na racionalização dos consumos de energia e tem-se revelado um investimento bastante atrativo e de rápido retorno.

Apesar do processo em causa não estar diretamente ligado ao tratamento de águas residuais, mas sim à manutenção das boas condições do ar na envolvente da ETAR e à garantia de segurança dos funcionários, este tem-se revelado um processo com algum peso no panorama energético das instalações. Este processo poderá ser responsável por consumos de energia elétrica numa ETAR situados no intervalo entre os 5 e o 20% (Catarino & Henriques, 2015) dependendo do tamanho da instalação.

Na figura seguinte está representado um diagrama de carga de um ventilador, associado ao sistema químico de tratamento do ar, afeto a uma instalação com capacidade de tratamento de 19.300 m³/dia e que possui dois ventiladores com uma capacidade unitária máxima de 40.000 m³/h.

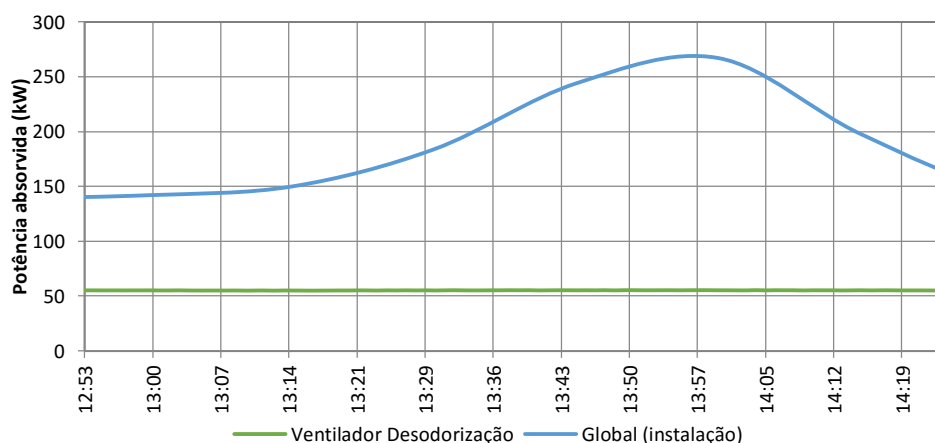


Figura 4.10 - Diagrama de carga referente a um ventilador do processo de desodorização (Schneider Electric, 2014)

Os equipamentos afetos a este tratamento (2 ventiladores com uma potência nominal unitária de 55 kW) contribuem com cerca de 10% para a potência total instalada na ETAR. O facto dos equipamentos operarem em função da tabela de tempo, sonda de sulfídrico e encravados com a bomba centrífuga de desidratação de lamas leva a que tenham elevadas horas de funcionamento, assumindo, em conjunto, valores próximos das 5.000 horas anuais. Os elevados períodos de funcionamento aliados à elevada potência absorvida por cada um dos equipamentos leva a que contribuam com cerca de 19% do total dos consumos da instalação.

Tal como apresentado ao longo do presente capítulo, este tipo de instalações comporta diversos equipamentos com diferentes especificações e as mais variadas necessidades energéticas. A importância da otimização dos consumos de energia e da melhoria de eficiência associadas a estes equipamentos e tecnologias têm vindo a crescer no campo do tratamento de águas residuais (Bodik & Kubaská, 2013). Desta forma, a existência de metodologias e/ou indicadores que permitam às entidades avaliar o desempenho de ETAR têm-se revelado ferramentas que têm ganho visibilidade no que à operação de ETAR diz respeito, assumindo-se como um pilar importante na sua gestão e operação.

4.3 Avaliação do Desempenho Energético e sua Aplicação a ETAR

Quando o objetivo está relacionado com o incremento no nível de desempenho energético de um determinada instalação surge a necessidade de avaliar a forma como a energia é gerida, compreendendo a relação entre o consumo e os parâmetros de funcionamento das instalações. Esta avaliação é desenvolvida com base em indicadores de desempenho energético, tais como, valores, rácios ou modelos, previamente definidos pela organização.

Nos pontos subsequentes são abordadas algumas metodologias existentes com vista à avaliação do desempenho energético e global das instalações. Note-se que apesar de parte das metodologias abordadas nos pontos seguintes não se focarem unicamente na avaliação do desempenho energético de ETAR, a sua aplicação a este tipo de instalações poderá revelar-se bastante útil.

4.3.1 Protocolos de Medição e Verificação

A caracterização e determinação do desempenho energético de uma instalação, depende do desenvolvimento e aplicação de práticas de medição e verificação (M&V). Neste tipo de processos são analisadas medidas cujo objetivo assenta na determinação e reporte do impacto da implementação de medidas de racionalização de consumos energéticos (MRCE) ou programas de eficiência energética, possibilitando a aferição das poupanças alcançadas. Realça-se que apesar destas práticas direcionarem-se para a quantificação da poupança alcançada por intermédio da aplicação de MRCE e programas de eficiência energética, estas poderem ser aplicadas tendo em vista a aferição do desempenho energético de instalação, em determinados períodos de tempo.

A poupança, habitualmente referida em diversos documentos de referência na área da M&V, representa a ausência de consumo, pelo que não permite que seja medida. Desta forma, a sua determinação deverá ser efetuada através da comparação entre o consumo antes (período de referência) e depois (período de reporte) da implementação de determinada medida ou programas que visem a melhoria do desempenho energético das instalações, segundo a equação seguinte.

$$\begin{aligned} \text{Poupança reportada} \\ &= \text{Consumo durante o período de referência} \\ &- \text{Consumo durante o período de reporte} \pm \text{Ajustes} \end{aligned} \quad (1)$$

Tendo em vista a comparação entre os consumos em períodos distintos e consequente aferição da poupança gerada e nível de desempenho energético, torna-se essencial desenvolver metodologias de cálculo e ajuste para cada plano de M&V. Os ajustes efetuados deverão ter em conta fatores variáveis ou fixos com influencia nos consumos de energia, e podem ser periódicos (mudam regularmente e influenciam os consumos de energia durante o período de reporte – p.ex. clima ou produção) e não periódicos (não sofrem alterações de forma regular – p.ex. área da instalação). Para tal, são utilizados métodos matemáticos (p.ex. análise de regressão) cujo objetivo se prende em estabelecer relações entre os consumos energéticos e variáveis potencialmente influenciadoras das variações do mesmo, usualmente denominadas por variáveis independentes, para o período de referência.

Uma vez definida a relação entre a/as variáveis independentes e aferida uma metodologia de ajuste dos consumos de referência, torna-se possível efetuar comparações entre o consumo de energia expectável e o consumo de energia real. Sem o ajuste efetuado, a diferença entre os consumos nos dois períodos (período de referência e período de reporte) teria sido consideravelmente distinto, levando à obtenção de informações pouco fiáveis.

Atualmente, as práticas de M&V são documentadas em diversos protocolos de referência, de onde se destacam os seguintes:

- *International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)*

Publicado pela *Efficiency Valuation Organization (EVO)*, o IPMVP revela-se o protocolo de M&V de referência mundial. Nele são documentados termos comuns e métodos que visam a avaliação do desempenho energético de projetos de eficiência energética, o fornecimento de métodos com diferentes níveis de exatidão e custos, tendo em vista a determinação das poupanças e, por fim, onde são especificados os conteúdos de um plano de M&V. (EVO, 2009). A publicação do IPMVP teve como finalidade incentivar os investimentos de eficiência energética e racionalização de consumos e fornecer provas da eficácia de programas de gestão de energia numa grande variedade de instalações.

Este é composto por três volumes distintos e adequados a diferentes aplicações:

Volume I – Este volume define a terminologia e sugere boas práticas para documentar a eficácia de projetos de eficiência energética e o consumo eficiente de água implementados em edifícios e instalações industriais. Estes termos têm em vista o auxílio na preparação e desenvolvimento de planos de M&V, que especificam a forma de medição da poupança.

Volume II – Revê questões relacionadas com a qualidade do ar interior que podem ser influenciadas por um projeto de eficiência energética. Neste documento salientam-se as necessidades de conceção de um projeto e implementação de boas práticas para manter as condições interiores aceitáveis num projeto de eficiência energética.

Volume III – O Volume III do IPMVP aborda as aplicações específicas para o Volume I. Este é composto por dois manuais de aplicação. O primeiro (parte I) aborda os conceitos e práticas para a determinação da poupança de energia em edifícios novos, enquanto que o segundo (parte II)

tem o mesmo propósito mas para a determinação da poupança de energia em aplicações de energias renováveis.

O IPMVP fornece quatro opções que visam a determinação da poupança alcançada. A sua escolha implica diversas considerações e análises caso a caso.

Tabela 4.4 –Visão geral das opções do IPMVP (EVO, 2009)

Opções IPMVP	Descrição
<u>Opção A</u> Medição Isolada da MRCE: Medição dos parâmetros chave	Cálculo de engenharia do consumo de referência e do consumo do período de reporte através de: medições contínuas ou a curto prazo de parâmetros chave de funcionamento; e valores estimados. Realizar ajustes periódicos e não periódicos.
<u>Opção B</u> Medição Isolada da MRCE: Medição de todos os parâmetros	Medições a curto prazo ou contínuas do consumo de referência, consumo do período de reporte e cálculos de engenharia, usando medições de substituição de consumo de energia. Realizar ajustes periódicos e não periódicos
<u>Opção C</u> Toda a Instalação	Análise de dados do contador do consumo de referência de toda a instalação e do período de reporte. Realizar ajustes periódicos e não periódicos.
<u>Opção D</u> Simulação calibrada	Simulação do consumo de energia, calibrada com dados de faturação horários ou mensais

- *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects (FEMP)*

Em virtude de diversas políticas desenvolvidas nos Estado Unidos, no início da década de 90, que exigiam uma redução dos consumos energéticos em edifícios governamentais, foi lançado pelo Departamento de Energia norte-americano (U.S. DOE), o *Federal Energy Management Program*. Este programa incentivou o recurso a especialistas do sector privado no desenvolvimento de contratos de desempenho energético nos diversos edifícios governamentais. É neste sentido que surge o *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects*. Este documento, cuja elaboração se baseia no IPMVP, foi desenvolvido para proporcionar linhas orientadoras e aproximações necessárias para a medição e verificação dos resultados decorrentes dos contratos de desempenho celebrados entre entidade governamentais e parceiros do sector privado. Note-se que apesar de se basearem no IPMVP, as linhas orientadoras deste documento são direccionadas para as alterações efetuadas em edifícios governamentais, permitindo afirmar-se como uma aplicação prática do IPMVP (Natural Resources Canada's CanmetENERGY, 2008).

- *ASHRAE, Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings (ASHRAE)*

Este protocolo foi desenvolvido pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) de forma a colmatar a necessidade de homogeneizar os procedimentos de calculo de poupanças existentes. Este documento revela-se consideravelmente

mais técnico quando comparado com os protocolos de M&V, anteriormente apresentados, principalmente no estabelecimento de diretrizes na gestão de dados e em métodos para contabilizar as incertezas associadas a medições e modelos.

Tal como outros protocolos de M&V, este documento também possui diferentes abordagens, escolhidas em função das considerações e objetivos definidos em cada caso. Na tabela seguinte apresentam-se, a título informativo, as abordagens e respetiva descrição de cada uma.

Tabela 4.5 - Opções existentes no protocolo de M&V da ASHRAE (ASHRAE Guideline 14) – adaptado de (Natural Resources Canada's CanmetENERGY, 2008)

Abordagem	Descrição
Totalidade do Edifício	Esta abordagem utiliza o medidor de energia principal, utilizado pelo comercializador de energia. Utiliza o histórico de consumos com base para definição da <i>baseline</i>
Medição isolada	Esta abordagem utiliza equipamento de medição de forma a isolar os diversos subsistemas afetados pela medidas aplicadas. Todos os parâmetros devem de ser medidos.
Simulação do edifício	Este método é aplicável à totalidade de um edifício e utiliza software de simulação para criar um modelo de procura de energia para o edifício em estudo. Os parâmetros afetado por determinada medida são alterados no modelo definido com vista à obtenção da poupança gerada.

4.3.2 Benchmarking

Uma das mais práticas aproximações para determinar o desempenho de instalações é a análise comparativa, normalmente denominada por *benchmarking*. Esta revela-se um processo contínuo e sistemático que permite efetuar comparações dos desempenhos das organizações, assim como as funções por si desenvolvidas, face às melhores práticas existentes. Desta forma, torna-se possível determinar os pontos fortes e fracos das organizações e, conseqüentemente, proceder a uma intervenção com vista à otimização de processos.

Segundo o IBNET (IBNET, 2015) (*The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities*) existem várias metodologias de *benchmarking* que assumem especial relevância no tratamento de dados. Nos pontos subsequentes são referidas algumas metodologias existentes com vista à avaliação energética e global de instalações.

- Indicadores parciais;
- Indicadores de desempenho geral;
- Métodos estatísticos;

Os indicadores parciais consistem em rácios entre os *inputs* e *outputs* de uma determinada atividade e que se revelam de fácil aferição e interpretação. Este tipo de indicadores têm vindo a ser largamente utilizados pelas organizações, uma vez que se revelam de fácil aferição permitindo às entidades responsáveis pela gestão e operação das instalações ter um ponto de partida para a avaliação do seu desempenho. Contudo, apesar da regularidade com que são utilizados, os indicadores de desempenho parciais não entram em linha de conta com a relação entre algumas variáveis.

No sector do tratamento das águas residuais, este tipo de indicadores é comumente utilizado tendo em vista a comparação do desempenho de determinados equipamentos, processos ou instalações. Na tabela seguinte apresenta-se o indicador comumente utilizado na comparação do desempenho de equipamentos responsáveis pelo arejamento dos tanques afetos ao tratamento biológico do afluente.

Tabela 4.6 - Eficiência padrão de oxigenação de sistemas de arejamento (Environmental Dynamics International) & (Stenstrom & Rosso)

Sistema de arejamento	Eficiência de oxigenação (kg O ₂ /kWh)	
	Gama de variação	Média
Difusão de ar		
Bolha fina	3,6 – 4,8	4,2
Bolha grossa	1,2 – 2,1	1,7
Mecânicos de superfície		
Escova (horizontal)	1,2 – 2,1	1,7
Rotação vertical	1,5 – 2,1	1,8
Auto aspiração (flutuante)	0,6 – 0,9	0,8
Arejador Jet	1,2 – 2,1	1,7

Este tipo de indicadores revelam-se da maior importância uma vez que permitem às entidades responsáveis pela operação e manutenção das instalações, a escolha do processo que melhor se adapta às suas necessidades e que se revela mais eficiente, tanto do ponto de vista processual como energético.

O mesmo tipo de indicador é, muitas vezes, utilizado com vista à avaliação energética de determinado processo de tratamento de águas residuais. Na bibliografia especializada existem comparações entre o consumo de energia por volume de afluente tratado que cada tipo de processo, em função da dimensão da ETAR, pode representar. Na tabela seguinte apresentam-se resultados de um exercício comparativo entre os consumos de energia por volume de água tratada para diversos tipos de tratamento e respetiva dimensão da instalação, referente a um conjunto de instalações localizadas nos EUA.

Tabela 4.7 - Consumo específico típico de diferentes processos de tratamento (Focus on Energy, 2006)

Tipo de tratamento	Volume tratado (m ³)	Consumo específico médio (kWh/m ³)
Lamas ativadas	0 - 3.800	1,43
	3.800 - 18.900	0,13
	>18.900	0,12
Lagoas arejadas	<3.800	1,92
Vala de oxidação	4.500	1,53

Os valores acima referidos constituem apenas uma primeira aproximação do patamar de consumos em que cada tipologia de instalação se encontra. Contudo, a sua utilização poderá

revelar-se útil aquando do desenvolvimento de análises técnico-financeiras com vista à construção ou remodelação deste tipo de infraestruturas.

Os indicadores de desempenho global são calculados com base no quociente entre os inputs e os outputs que resultam de uma determinada atividade. Note-se que aquando da existência de múltiplos inputs e outputs é efetuada uma soma ponderada, tendo em conta a importância de cada um, de forma a proceder ao cálculo do indicador.

Contudo, apesar da facilidade de aferição e dos poucos requisitos relacionados com os dados necessários ao seu cálculo, é possível afirmar que este indicador possui uma grande limitação devido à sua abrangência. Uma vez que pondera diversos inputs e outputs decorrentes de uma dada atividade, a sua eventual decomposição com vista à avaliação, apenas, de uma dada secção revela-se inviável.

Por último, os métodos de inferência estatística têm-se revelado ferramentas essenciais na construção de modelos que permitam estimar parâmetros essenciais ao controlo das mais variadas operações. O desenvolvimento deste tipo de modelos, apesar de se revelar bastante útil, requer um conjunto de dados suficientemente alargado que permita assegurar a sua fiabilidade, assim como a dos resultados gerados por si. Note-se que, segundo o IBNET (2015), a fiabilidade dos resultados alcançados e os dados recolhidos têm-se revelado as tarefas de maior dificuldade no desenvolvimento deste tipo de modelo. No entanto, é importante realçar que a crescente massificação dos aparelhos de medição e monitorização existentes atualmente no mercado, assim como a crescente utilização dos mesmos em diversos sectores, tem vindo a simplificar a aquisição dos dados que servem de base a este tipo de modelos.

É no sentido de agregação e partilha destes dados que alguns países têm direcionado esforços de forma a minimizar este problema, criando plataformas informáticas que permitam aos gestores das instalações fazer o *upload* de dados operacionais, indicadores de desempenho e, ao mesmo tempo, procederem à consulta de informações relativas a outras ETAR, permitindo assim análises comparativas entre si. O sistema VASS, desenvolvido pela *Swedish Water & Wastewater Association* (SWWA), é um exemplo prático deste tipo de plataforma. As empresas municipais de tratamento de águas residuais têm aderido em massa a esta plataforma, existindo já cerca de 70% das instalações localizadas na Suécia que efetuam o reporte de dados das suas instalações. Uma vez colocados numa plataforma, os dados recolhidos poderão servir de base à elaboração de estudos, individuais ou em conjunto, permitindo assim um conhecimento mais aprofundado da relação entre os consumos energético e as variáveis produtivas decorrentes deste tipo de sector, contribuindo assim para a melhoria contínua do processo de tratamento. Note-se que a divulgação dos dados por parte deste tipo de empresas não resulta num problema que ponha em causa a sua competitividade uma vez que representam entidades públicas com um monopólio natural (Balmér & Hellstrom, 2012).

4.3.3 Indicadores Energéticos

Os indicadores de desempenho energético podem ser definidos como um valor, rácio ou modelo, definido pelas organizações como uma medida do seu desempenho energético. Estes são métricas simples que relacionam o consumo energético com variáveis que influenciam esse mesmo consumo, permitindo a obtenção de informação relacionada com o desempenho energético de determinada instalação.

4.3.3.1. Indicadores SGCIE

Em Portugal, este tipo de indicadores são comumente utilizados em unidades industriais abrangidas pelo Sistema de Gestão dos Consumos de Energia (SGCIE). Este sistema surge no seguimento da reestruturação do Regulamento de Gestão do Consumo de Energia (RGCE) promovida pela Estratégia Nacional para a Energia, aprovada pela RCM nº169/2005, de 24 de Outubro. O SGCIE foi instituído com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorização dos consumos energéticos das instalações consumidoras intensivas de energia (CIE) que no ano anterior tenham atingido consumos energéticos iguais ou superiores a 500 tep/ano. Estas ficam sujeitas à realização periódica de auditorias energéticas cujo foco seja as condições de uso da energia e a elaboração e execução dos planos de racionalização dos consumos de energia (PREn) que, após aprovação por parte da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) será convertido num acordo de racionalização dos consumos de energia (ARCE).

O acompanhamento de todas as metas e objetivos delineados no âmbito do ARCE é feito periodicamente através da elaboração do relatório de execução e progresso (REP) onde são referidas todas as metas alcançadas, assim como desvios e medidas corretivas.

É importante realçar que no âmbito do artigo 12º do Decreto-Lei nº68A/2015, de 30 de Abril, é decretada a obrigatoriedade de todas as empresas que não se enquadrem na categoria de pequena e média empresa (PME) realizarem auditorias energéticas às suas instalações, edifícios ou frotas. Para as instalações, edifícios ou frotas sujeitas às auditorias periódicas no âmbito dos regimes do SGCIE, SCE e RGCE-ST, as auditorias energéticas no âmbito do Decreto-Lei 68A têm que cumprir os requisitos mínimos constantes dos respetivos diplomas, de onde se destacam os indicadores energéticos. Assim, e tendo em conta o não enquadramento das entidades que gerem as ETAR na definição de PME, é expectável um aumento do número de instalações que sejam objeto de estudo no âmbito de uma auditoria energética, levando a que seja importante definir indicadores capazes de demonstrar o desempenho energético deste tipo de instalações.

Tendo em vista a resposta a todas as metas estabelecidas no âmbito do SGCIE, é definido um conjunto de indicadores que visam a avaliação dos consumos de energia que cada organização tem com o seu processo produtivo, nomeadamente:

- Consumo Específico de Energia (CEE) que é medido pelo quociente entre o consumo total de energia e o volume de produção.
- Intensidade Energética (IE) que resulta do rácio entre o consumo total de energia e o valor acrescentado bruto (VAB) das atividades empresariais diretamente ligadas às instalações industriais;
- Intensidade Carbónica (IC) que é medida pelo quociente entre o valor das emissões de gases com efeito de estufa, resultantes do *mix* energético utilizado no processo produtivo, e o respetivo consumo total de energia.

É importante destacar que apesar dos indicadores estabelecidos no âmbito do SGCIE serem aplicados a todas as entidades por si abrangidas, estes podem não ser representativos do real desempenho energético de uma instalação. Para cada um dos indicadores estabelecidos no SGCIE existem algumas particularidades que podem inviabilizar a sua utilização. Nos pontos seguintes é apresentada uma análise crítica aos indicadores preconizados no âmbito do SGCIE.

✓ Consumo Específico de Energia - Problemas associados e sua validação

Um dos problemas associados ao indicador do consumo específico está relacionado com a existência de equipamentos ou processos cujo seu funcionamento é independente da taxa de produção. Este aspeto é, muitas vezes, evidente em instalações cujo controlo dos equipamentos responsáveis pelo processo produtivo é reduzido e deixa pouca margem de manobra para uma adequabilidade às condições de produção. No caso concreto das estações de tratamento de águas residuais, a problemática em causa também é recorrente.

A existência de vários tipos de produção também poderá levar a que um processo de avaliação do desempenho energético baseado no consumo específico de energia poderá revelar-se pouco válido. Dependendo do tipo de instalação, o indicador em causa pode ser calculado produto a produto, somatório de todos eles ou por processo. O facto do indicador poder ser calculado com este grau de liberdade poderá levar a que a monitorização do desempenho energético seja erradamente aferida.

De forma a não cometer erros na utilização e aplicação do indicador do consumo específico de energia numa dada instalação é aconselhável recorrer a ferramentas que permitam proceder à sua validação. Um dos métodos utilizados na validação do indicador em causa resulta da aplicação de um modelo usualmente utilizado em análise estatística denominado por modelo de regressão que permite verificar se duas variáveis são independentes ou dependentes através de uma função linear, logarítmica, exponencial ou polinomial.

O primeiro passo para avaliar a relação entre duas variáveis passa pela construção de um diagrama de dispersão de forma a conseguir visualizar a forma como os pontos em análise se distribuem. Numa segunda fase é necessário avaliar a existência de relação entre as variáveis em análise que pode ser conseguida através de medidas de associação designadas por coeficientes de correlação e determinação.

Considerando duas amostras representadas por X_1, \dots, X_n e Y_1, \dots, Y_n o coeficiente de correlação de Pearson é dado por:

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

Note-se que \bar{X} e \bar{Y} dizem respeito às médias aritméticas de cada uma das variáveis em questão e que são calculadas da seguinte forma:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

O coeficiente de Pearson pode tomar valores entre:

$$-1 \leq R_{x,y} \leq 1$$

Desta forma é possível quantificar a relação entre as duas variáveis em estudo. Um coeficiente de correlação ($R_{x,y}$) variável entre 0 e 1 indica que ambas as variáveis tendem a aumentar ou diminuir simultaneamente. Caso o coeficiente de variação tome valores entre -1 e 0 diz-se que a correlação obtida é negativa, ou seja, quando uma variável aumenta o seu valor a outra diminui.

Uma outra interpretação do coeficiente de correlação passa por avaliar o quadrado do seu valor, usualmente denominado por coeficiente de determinação (R^2) e que se situa entre 0 e 1. A interpretação deste coeficiente mede a variabilidade de uma das variáveis explicada pela outra.

Um coeficiente de determinação $R^2=0$ significa que nenhuma variação é explicada pelo modelo, portanto o modelo não fornece nenhuma orientação para a compreensão das variáveis em Y, ou seja, as variáveis independentes selecionadas não dão nenhuma explicação acerca das variações observadas em Y. Por outro lado, um coeficiente de determinação $R^2=1$ significa que o modelo explica 100% das variações ocorridas em Y. Geralmente quanto maior for o coeficiente de determinação, melhor o modelo descreve a relação entre as variáveis dependentes e independentes. Embora não exista uma norma que estabeleça um valor mínimo deste coeficiente, é assumido que 0,75 poderá ser considerado um indicador razoável de uma boa relação causal entre as variáveis dependentes e as independentes (EVO - Efficiency Valuation Organization, 2009).

Em virtude do grau de liberdade associado ao cálculo deste indicador e tendo em conta o exposto nos parágrafos anteriores torna-se importante realçar que a utilização do indicador “consumo específico” deverá ser considerada apenas quando exista uma relação estatisticamente válida, comprovada com recurso ao coeficiente de determinação (R^2), entre o consumo de energia de uma e a respetiva produção decorrente de uma determinada instalação ou processo.

✓ **Intensidade Energética – Problemas associados**

Tal como apresentado anteriormente, a intensidade energética baseia-se no quociente entre o consumo de energia de uma dada instalação e o valor acrescentado bruto (VAB) da entidade no ano em análise. O VAB apresenta a diferença entre os custos inerentes ao processo produtivo e as receitas provenientes das vendas dos produtos da empresa. Segundo o Despacho nº17449 de 2008, o cálculo do valor acrescentado bruto pode ser efetuado da seguinte forma:

$$VAB [€] = \text{Vendas e Prestação de Serviços} - \text{Custos de Produção e Variáveis} \quad (4)$$

As variáveis anteriores podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \text{Vendas e Prestação de Serviços} \\ & = \text{Vendas (POC 71)} + \text{Prestações de Serviço (POC 72)} \\ & + \text{Proveitos Suplementares (POC 73)} \\ & + \text{Trabalhos para a Própria Empresa (POC 75)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{Custos de Produção Variáveis} \\ & = \text{Custo das mercadorias vendidas e das matérias consumidas (POC 61)} \\ & + \text{Fornecimento e Serviços Externos (POC 62)} \\ & + \text{Outros Custos e perdas operacionais (POC 65)} \end{aligned} \quad (6)$$

Este indicador revela alguns problemas quando o objetivo é a avaliação do desempenho energético de uma instalação. Note-se que o VAB das empresas é um valor desenvolvido segundo uma vertente económica e que tem como objetivo medir a contribuição produtiva de uma empresa para a produção nacional num determinado período. (Ferreira, 1982). Tendo em conta o exposto

é visível a dificuldade que existe em utilizar o VAB para servir de base de um indicador de eficiência energética, uma vez que se trata de um valor relacionado apenas com a atividade económica da empresa, tal como apresentado no trabalho desenvolvido por Silva M.G. (2014)

Uma evidencia da falta de representatividade da utilização do VAB como elemento base para a definição de um indicador energético assenta no facto dos investimentos feitos pelas empresas poderem não ter um carácter anual mas sim a médio ou longo prazo. A título de exemplo, e de forma a exemplificar a problemática em causa, uma empresa que adquira ,num dado ano, matéria prima necessária para produzir o seu produto nos próximos dois anos obterá um valor de VAB, no ano de aquisição, mais baixo do que quando comparado com o segundo ano, onde não teve de efetuar esse investimento. Esta variação do valor do VAB poderá não causar impactos nos consumos de energia da instalação e, portanto, poderá não fazer sentido considerar a intensidade energética como um indicador de eficiência energética.

✓ **Intensidade Carbónica - Problemas associados**

Tal como o consumo específico e a intensidade energética, a intensidade carbónica é um outro indicador utilizado na avaliação do desempenho energético nas instalações abrangidas pelo SGCIE. Como referido anteriormente, o seu cálculo é determinado através do quociente entre as emissões de gases com efeito de estufa e pelo consumo de energia. As emissões de gases com efeito de estufa são calculadas com base nos fatores de emissão, referidos em kgCO₂e/GJ ou kgCO₂e/tep, apresentados na Tabela 1 do Despacho nº17313/2008.

Este indicador não representa um indicador do desempenho energético da instalação, uma vez que apenas depende do *mix* energético utilizado numa dada empresa. No caso de uma dada empresa utilizar sempre a mesma fonte de energia, o valor da intensidade carbónica não se altera ao longo do tempo, independentemente da evolução do seu desempenho energético.

Apesar dos indicadores acima referidos não serem direcionados concretamente para ETAR, a existência de instalações deste género que são consumidoras intensivas de energia, leva a que haja a necessidade de cálculo destes indicadores, de forma a que sejam respeitados os objetivos gerais, e conseguidos os benefícios decorrentes do cumprimento das obrigações referidas na legislação (Decreto-Lei nº71/2008).

4.3.3.2. Outros Indicadores

Silva & Rosa (2015) desenvolveram um estudo baseado em indicadores energéticos definidos especificamente para a atividade de tratamento de águas residuais que consistiu num sistema de avaliação de desempenho para este tipo de instalações. O estudo em causa teve como objetivo a definição de um conjunto de indicadores energéticos que relacionassem os consumos das instalações com variáveis decorrentes do tratamento de águas residuais, de onde se destacam os indicadores kWh/m³(wtRU03.1), kWh/CBO removido (wtRU03.2) e kWh/CQO removido(wtRU03.3). Para tal, foram recolhidos dados, referentes a 5 anos, de 17 ETAR localizadas em Portugal, onde foram considerados dois agregados distintos:

- I) Lamas ativadas sem decantação primária (*AS w/o 1sed.*)
- II) Lamas ativadas com decantação primária. (*AS after 1sed.*)

Os dados obtidos através da análise efetuada permitiram verificar que o consumo de energia para o sistema de lamas ativadas sem decantação primária, por volume de água tratada (0,72-1,34 kWh/m³), é cerca de duas vezes superior ao registado por um sistema com decantação primária

(0,31-0,84 kWh/m³), devendo-se principalmente à maior quantidade de carga orgânica que entra no tratamento biológico. Quanto aos resultados obtidos com base na carga poluente removida, o consumo de energia localizou-se, em média, nos 2,8 kWh/kg CBO removido e os 1,3 kWh/kg CQO removido.

Os autores referem ainda que o consumo de energia nas ETAR depende do processo de tratamento, da qualidade do tratamento e das cargas poluentes presentes no afluente. Através dos resultados obtidos foi possível verificar que maiores ETAR e com tecnologias mais avançadas geralmente consomem mais energia mas, normalmente, utilizam-na de forma mais eficiente, levando a que o consumo de energia por volume de água tratado seja menor para maiores volumes ou cargas poluentes removidas, tal como evidenciado na figura seguinte.

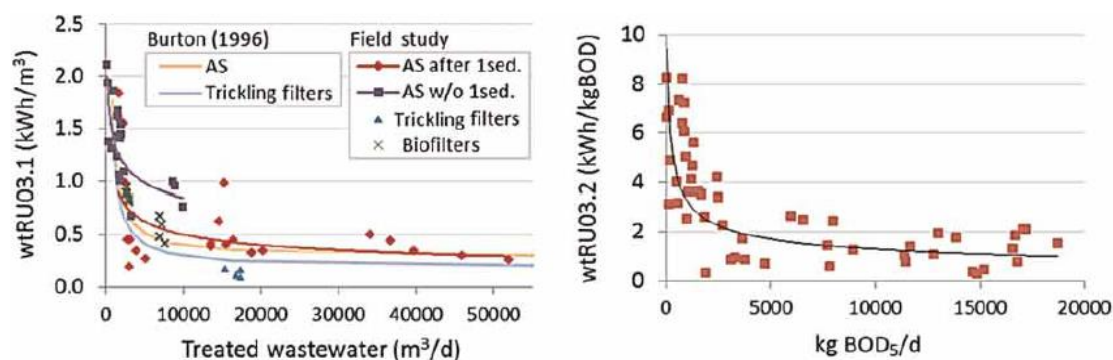


Figura 4.11 - Consumo de energia vs Volume de água tratada; Consumo de energia vs CBO removido - adaptado de (Silva & Rosa, 2015)

Dada a similaridade entre as relações observadas pelos autores e as obtidas no âmbito dos trabalhos efetuados por Burton F.L. (1996), observável através da figura 4.11 (esquerda), utilizaram-se as relações daí obtidas de forma a definir equações capazes de gerar valores de referência para o consumo de energia por volume de água tratado ($wtRU03.1$), apresentadas na figura seguinte.

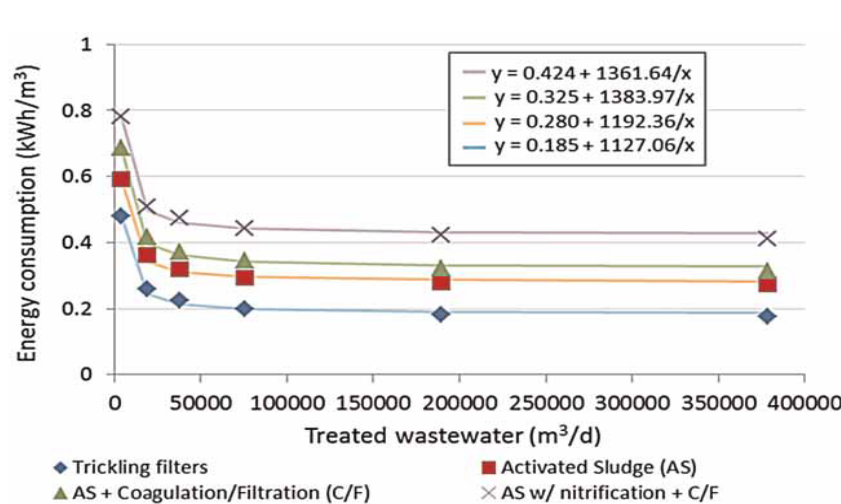


Figura 4.12 - Consumo de energia vs Volume de água tratado para quatro tipos de tratamento (Silva & Rosa, 2015)

Quanto ao indicador que relaciona o consumo de energia com o CBO removido, Silva & Rosa (2015) definiram como base da sua avaliação, tal como sucedia com o consumo de energia por

volume de água tratado, os dados recolhidos e utilizados em estudos efetuados em diferentes países, apresentados na figura seguinte.

Desta forma, o alcance dos dados foi usado para definir valores de desempenho e categoriza-los como “Bom”(<2 kWh/kg CBO), “Aceitável”(2-10 kWh/kg CBO) ou “insatisfatório”(>10 kWh/kg CBO), baseados no consumo de energia por CBO removido,

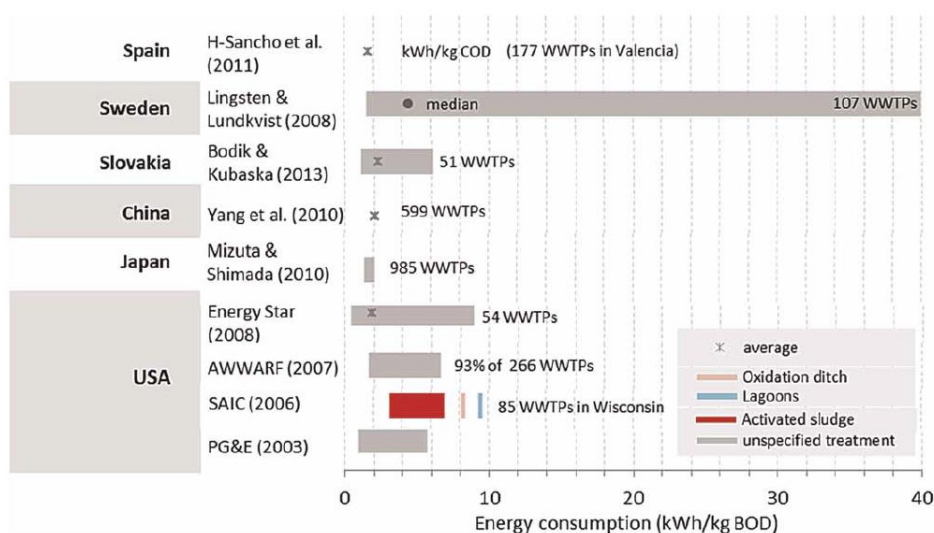


Figura 4.13 - Consumo de energia por kg de CBO removido em diferentes países (Silva & Rosa, 2015)

As equações definidas para a avaliação do desempenho das ETAR e cálculo dos indicadores são apresentadas na figura seguinte.

PI reference values			
<i>wtRU03.1 - Energy consumption [kWh/m³]</i>			
TF	● ≤ 0.185 + 1127/TW	● [0.185 + 1127/TW; 0.231 + 1409/TW]	● ≥ 0.231 + 1409/TW
AS	● ≤ 0.280 + 1192/TW	● [0.280 + 1192/TW; 0.350 + 1490/TW]	● ≥ 0.350 + 1490/TW
AS + coagulation/ filtration (C/F)	● ≤ 0.325 + 1384/TW	● [0.325 + 1384/TW; 0.406 + 1730/TW]	● ≥ 0.406 + 1730/TW
AS w/ nitrification + C/F	● ≤ 0.424 + 1362/TW	● [0.424 + 1362/TW; 0.530 + 1703/TW]	● ≥ 0.530 + 1703/TW
<i>wtRU03.2 - Energy consumption [kWh/kg BOD₅]</i>			
	● ≤ 2	● [2; 10]	● ≥ 10

TW = treated wastewater (m³/d); BOD₅ = influent BOD₅ (mg/L); 'good' (●), 'acceptable' (●) and 'unsatisfactory' (●) performance.

Figura 4.14 - Valores de referência obtidos – adaptado de (Silva & Rosa, 2015)

4.3.4 Valor Sustentável

Este tipo de indicadores foram abordados na metodologia desenvolvida por Catarino J., et al, (2007) no Manual Valor Sustentável (VS), que assenta no conceito de valor sustentável, definido como a relação entre a satisfação das necessidades e os recursos utilizados no desenvolvimento de uma determinada atividade, tal como evidenciados nos termos da equação seguinte.

$$Valor\ Sustentável = \frac{Satisfação\ das\ necessidades}{Recursos\ utilizados} = \frac{\sum \varphi S}{Recursos\ utilizados} \quad (7)$$

A metodologia VS consiste essencialmente na avaliação e melhoria do desempenho funcional dos processos, produtos e recursos utilizados, entrando em conta com a apreciação de critérios técnicos, económicos, ambientais e sociais.

Esta metodologia consiste numa abordagem faseada a um determinado objeto de estudo da empresa (produto, processo produtivo ou conjunto dos dois). A sua aplicação leva as empresas a identificarem as eco ineficiências do seu objeto de estudo, que originam desperdícios de recursos, impactes ambientais e sociais, mas também a reequacionarem os seus processos e produtos, avaliando a forma como estes desempenham as suas funções, do ponto de vista ambiental, económico e social.

A caracterização do desempenho do objeto de estudo é elaborado através de funções que traduzem as necessidades funcionais dos utilizadores. É com este objetivo que foi criada a fase “análise funcional” que se revela das mais importantes no método da análise de valor e que consiste num processo sistemático que inventaria, caracteriza, classifica e avalia integralmente as funções do objeto de estudo, assim como as relações entre elas. Desta forma, o objeto de estudo passa a ser definido como um conjunto de funções cujo desempenho irá depender do grau de satisfação dos utilizadores. A sua caracterização deve ser efetuada segundo critérios técnicos, ambientais e sociais, níveis desejáveis e níveis existentes definidos pela equipa de trabalho que permitam avaliar posteriormente o desempenho do objeto de estudo face às funções inventariadas.

Após a caracterização das funções existe a necessidade de proceder à sua hierarquização de forma a definir a sua importância relativa, uma vez que nem todas possuem o mesmo grau de importância. Este exercício é efetuado de acordo com uma matriz de avaliação da importância relativa das funções de forma a obterem-se ponderações (φ) mais consistentes. Para tal são atribuídas pontuações de 0 a 3 onde 0 representa a igualdade de importância entre duas funções, 1 para ligeiramente mais importante, 2 para medianamente mais importante e 3 para muito mais importante. A título de exemplo é apresentada, na figura seguinte, uma matriz de hierarquização e respetivos coeficientes de ponderação. Segundo o significado das pontuações acima referidas e após análise comparativa entre as funções “A” e “B”, conclui-se que a função “A” é definida como “ligeiramente mais importante” que a função “B”.

A	B	C	D	E
A	A1	A3	A4	A3
	B	B1	B4	B3
		C	C4	C3
			D	E3
				E

	Total	Ajuste	Coefficiente de ponderação (Φ)	Ordem
A	11	11	35,4	1
B	10	10	32,3	2
C	7	6	19,4	3
D	3	3	9,7	4
E	0	1	3,2	5
Total	31	31	100	

Figura 4.15 - Matriz de Hierarquização das funções e determinação dos coeficientes de ponderação

Um dos problemas associados a esta matriz tem que ver com o facto de existir uma tendência para a função menos importante aparecer com pontuação nula (0). Este aspeto não significa que a função não deva existir mas sim que é a menos importante de todas. De forma a resolver este problema são efetuados ajustes de forma a eliminar este zero. Na figura acima apresenta-se, para a função “E”, o ajuste efetuado.

A metodologia apresentada foi utilizada por Henriques & Catarino (2015) na determinação do valor de um conjunto de estações de tratamento de águas residuais pertencentes ao grupo Águas

de Portugal. Numa fase inicial foram identificadas quatro funções essenciais ao tratamento de águas residuais, sendo elas: I) Remoção de cargas orgânicas; II) Remoção de sólidos; III) Remoção de carga microbiana e IV) Remoção de odores.

Após realização da matriz de hierarquizações foi atribuído um peso relativo à sua importância globalidade do processo (φ (%)). A satisfação de cada função (S) foi estimada com base no volume de água tratado, na concentração inicial (g/l) e na eficiência de remoção dos vários parâmetros indicativos da carga poluente (CBO, CQO e SST). Por fim, foi calculado o desempenho (φS) de cada função, permitindo aferir a contribuição de cada uma para a satisfação das necessidades. Como recursos utilizados (R), foram considerados apenas os consumos anuais de energia elétrica adquiridos exclusivamente ao comercializador de energia.

Na figura seguinte apresenta-se, a título de exemplo, uma tabela representativa de todos os parâmetros definidos e calculados que serviram de base ao cálculo do valor de cada instalação.

Tabela 4.4 – Análise funcional – Cálculo do valor (adaptado de Catarino & Henriques (2015))

Função	Fator de Ponderação (φ)	Critério	Satisfação (S)	Desempenho funcional	Recursos (R)	Valor
Remover Matéria orgânica	40%	Volume tratado Q; Eficiência de remoção CBO, CQO; CBO _{inicial} CQO _{inicial}	$Q \times (\eta_{CBO} \times CBO_{inicial} + \eta_{CQO} \times CQO_{inicial})$	$\varphi \times S$	Energia MWh/ano	$\sum \varphi S/R$
Remover sólidos	40%	Volume tratado Q; Eficiência de remoção SST; SST _{inicial}	$Q \times SST_{inicial} \times \eta_{SST}$			
Remover carga microbiana	10%	Volume tratado Q Remoção: Sim =100; Não=0	sim $Q \times 50^*$			
Remover odores	10%	Remoção: Sim=100; Não=0	sim $Q \times 100^{**}$			

* Satisfação =0 caso não exista desinfecção. 50% em situações em que a desinfecção seja feita através da adição de cloro e 100% caso seja utilizada a desinfecção por UV.

** Satisfação=0 se não existir desodorização. 50% se desodorização for incompleta e 100% caso o processo seja complementado com adição de químicos

Tal como referido anteriormente, este tipo de indicador enquadra-se na categoria dos indicadores de desempenho global, focando-se na globalidade dos recursos utilizados no seu processo produtivo e na satisfação das suas necessidades.

No caso concreto do tratamento de águas residuais, e tendo em conta a forma como foi desenvolvido, este indicador poderá representar uma primeira aproximação no processo de avaliação do desempenho da instalação, dando especial destaque à satisfação das necessidades dos utilizadores.

A grande desvantagem da utilização desta metodologia na avaliação do desempenho energético deste tipo de instalações está relacionado com a ponderação de cada uma das funções no cálculo do desempenho funcional, a si associado. Note-se que esta ponderação é aferida com base na

matriz de hierarquizações anteriormente definida, e determinada em função da sensibilidade dos avaliadores. Desta forma, e tendo em conta que a sua definição é aferida com base na satisfação das necessidades da empresa, torna-se difícil relacionar cada uma das funções com a variação do consumo energético e, conseqüentemente com o desempenho energético da instalação.

4.3.5 Energy Score

Tendo em vista a avaliação do desempenho energético do setor do tratamento de águas residuais, foi lançado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) o programa *Energy Star Score*. Este tem como objetivo a definição de um modelo que estabeleça uma avaliação do desempenho energético de uma dada instalação relativamente aos restantes pares presentes na amostra, entrando em conta com variáveis relacionadas com a sua atividade.

Esta metodologia foi utilizada na avaliação do desempenho energético de estações de tratamento de águas residuais nos EUA. Para tal foram tratados e analisados dados relativos a uma amostra de 257 ETAR cujo seu processo contemplasse tratamento primário, secundário e tratamento avançado com e sem remoção de nutrientes.

Foi utilizada uma análise de regressão que através da utilização de variáveis independentes permite gerar uma variável dependente, usualmente definida como um consumo específico de energia (denominado na bibliografia referente ao *Energy Star score* como EUI – *Energy Use Intensity*), relacionando a variável energia com uma variável associada ao processo produtivo de determinada instalação. Para o caso concreto das ETAR, a variável dependente definida relaciona o consumo de energia com o volume de água tratada (consumo específico). As variáveis independentes utilizadas para aferir o consumo específico de energia expectável são as seguintes:

- Volume afluente médio;
- Concentração de CBO presente no afluente;
- Concentração de CBO presente no efluente;
- Fator de carga;
- Remoção de nutrientes (sim ou não);
- Filtro biológico (sim ou não);
- Graus dia de aquecimento e arrefecimento;

Com a definição de uma equação capaz de prever os consumos de energia com base nas variáveis independentes, é possível determinar um rácio de eficiência energética que é determinado através do quociente entre os consumos de energia por volume de água tratado real e aquele gerado pelo modelo, tal como enunciado na equação seguinte:

$$\text{Rácio de Eficiência Energética} = \frac{\text{Consumo específico real}}{\text{Consumo gerado pelo modelo}} \quad (8)$$

Tendo em conta a equação acima definida, pode dizer-se que um rácio de eficiência energética baixo (<1) indica que os consumos energéticos gerados pelo modelo situaram-se acima dos consumos reais verificados pela instalação.

A análise do conjunto de instalações presentes na amostra permite definir uma curva, devidamente ajustada, que serve de base comparativa do desempenho entre as instalações. Assim, através do cálculo do rácio de eficiência energética é possível determinar em que percentil é que uma dada ETAR se encontra, comparativamente com as restantes.

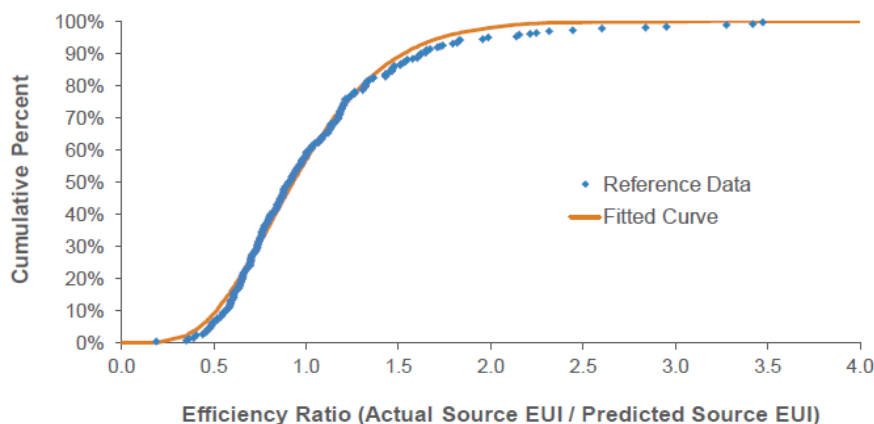


Figura 4.16 - Distribuição ETAR – adaptado de (Energy Star, 2014)

De forma a facilitar a compreensão da aferição do desempenho das instalações, segundo a metodologia em causa, considere-se a existência de uma instalação cujo seu rácio de eficiência corresponde a 1 (eixo das abcissas). Da análise à tabela presente no Anexo I verifica-se que a instalação em causa encontra-se próxima do percentil 62% (eixo das ordenadas), o que permite afirmar que 62% da população é mais eficiente do que a ETAR em causa. Tendo em conta o percentil em que a ETAR se encontra e tendo em conta a informação presente no Anexo I, verifica-se que o *Energy Star Score* obtido para esta instalação é de 40 (em 100), o que revela que a ETAR em causa encontra-se a operar de forma pouco eficiente.

Este tipo de modelos e análises apenas se conseguem desenvolver com a aquisição de dados decorrentes da atividades desenvolvidas, assim como a sua respetiva divulgação. Quanto à sua aquisição, esta tem vindo a revelar-se uma tarefa difícil de realizar uma vez que, para além de serem necessários vários parâmetros de análise, muitas vezes as instalações não possuem dispositivos que permitam a sua recolha de forma célere e precisa. Em consequência, alguns estudos que visem a melhoria das condições de utilização de energia nas ETAR poderão estar condicionados.

5. CASO DE ESTUDO

5.1 Enquadramento

Tendo em vista a persecução dos objetivos definidos no contexto da presente dissertação, utilizaram-se os dados e informação decorrentes da realização de diagnósticos energéticos a 13 ETAR. Os diagnósticos em causa enquadraram-se no procedimento concursal “PIEENV2013 – ETAR Lote LVT”, lançado pelo Grupo Energia da empresa Águas de Portugal tendo sido realizados em parceria pela empresa Schneider Electric Portugal, SA (SEP) e pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), no âmbito de um protocolo de colaboração na área da Gestão de Energia vigente entre as partes. Nos pontos subsequentes apresenta-se informação genérica relacionada com as características das diversas instalações analisadas, assim como as tarefas realizadas no âmbito do trabalho em causa.

5.2 Caracterização Genérica das Instalações

As 13 estações de tratamento de águas residuais a que se refere o presente caso de estudo pertencem a um conjunto de empresas responsáveis pela gestão e exploração de sistemas multimunicipais.

As ETAR em estudo inserem-se em vários subsistemas municipais, localizadas na zona de Lisboa e Vale do Tejo com características de dimensionamento e de operação distintas. Na figura seguinte está representada a localização de cada uma das instalações analisadas.

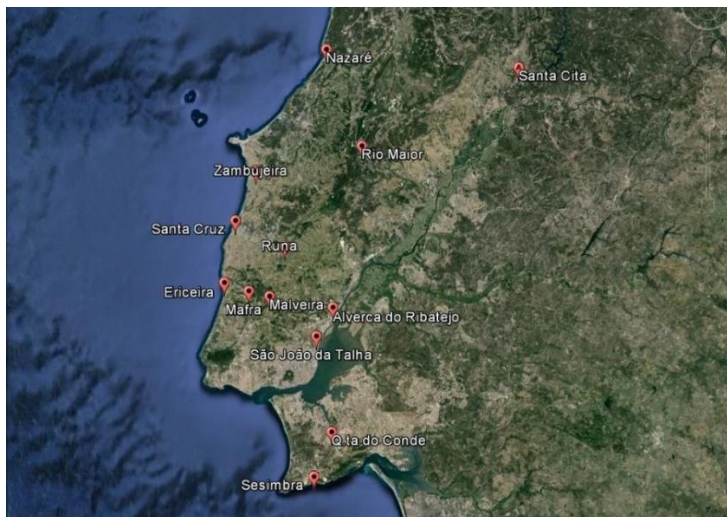


Figura 5.1 - Localização das ETAR analisadas

Note-se que, em virtude da política de divulgação de dados da empresa Águas de Portugal, S.A., não serão divulgados os nomes de cada uma das instalações analisadas no âmbito da presente dissertação. Desta forma, a referência a cada umas das ETAR será feita com recurso a um código alfabético, do tipo “ETAR n” (n = A,...,M).

Na tabela seguinte são enunciadas as características de cada ETAR, tais como a capacidade de tratamento diária, o número de habitantes equivalentes para o horizonte do projeto, o volume médio tratado, calculado com base nos dados disponíveis, ano de construção e a relação entre o volume médio de água tratada e a capacidade de tratamento de cada uma das instalações.

Tabela 5.1 - Características de funcionamento das ETAR

ETAR	Capacidade de tratamento projeto (m ³ /dia)	População de projeto (Hab. equivalentes)	Volume médio tratado (m ³ /dia)	População Atual (Hab. equivalentes atuais)	Tipo de Tratamento	Ano de Construção	Relação entre Volume tratado e projetado
ETAR A	985	6.330	426,6*	725	Lamas ativadas	2012	0,43
ETAR B	2.185	8.150	3.421,3***	8.000	Lamas ativadas (valas de oxidação)	1997	1,57
ETAR C	5.030	14.000	3.332,0***	10.530	Lamas ativadas	1997	0,66
ETAR D	3.325	17.500	2.382,0*	13.600	Lamas ativadas	2003	0,72
ETAR E	4.750	25.000	1.758,8**	12.500	Lamas ativadas	2006	0,37
ETAR F	6.000	30.000	2.707,0***	17.000	Lamas ativadas (Biofiltros)	2001	0,45
ETAR G	5.887	44.000	2.801,9***	[16.000 – 25.000]	Lamas ativadas	1999	0,48
ETAR H	11.400	60.000	2.440,9**	[18.000-30.000]	Lamas ativadas	2007	0,21
ETAR I	8.160	68.000	3.994,7**	10.145	Lamas ativadas	2002	0,49
ETAR J	8.180	79.830	4.732,4	45.000	Lamas ativadas	2006	0,58
ETAR K	19.300	94.000	3.948,9*	17.700	Lamas ativadas (valas de oxidação)	2012	0,20
ETAR L	11.700	130.000	11.586,3***	153.000	Lamas ativadas	1997	0,99
ETAR M	47.086	153.880	10.598,5***	40.000	Lamas ativadas	2010	0,23

***2011/2012/2013 **2012/2013 *2013

5.3 Ações Desenvolvidas

No âmbito dos diagnósticos energéticos realizados concretizaram-se, de forma repartida entre o LNEG e a Schneider Electric Portugal, SA, ações essenciais à caracterização das condições de uso e consumo de energia do conjunto de instalações analisadas. Nos pontos subsequentes são descritas, de forma detalhada, as tarefas concretizadas pelas entidades supracitadas, tendo o autor da presente dissertação participado, enquanto elemento da equipa auditora, na generalidade das ações desenvolvidas.

✓ **Determinação das fontes de energia utilizadas, quantificação dos consumos energéticos e respetivos custos**

Tendo em vista a tarefa acima apresentada foi efetuada uma análise interpretativa às faturas de energia relativa ao ano anterior ou aos 12 meses que antecederam o início dos trabalhos. Foi avaliada a evolução da potência absorvida numa base mensal e anual, a distribuição dos consumos por período tarifário, a evolução mensal da energia reativa fornecida e consumida fora de vazio, e ainda a evolução da globalidade dos encargos financeiros com energia. Foi ainda efetuada a recolha, análise e respetivo tratamento dos registos do fornecedor de energia elétrica, nomeadamente os registos obtidos pelo sistema de telecontagem, que permitiram caracterizar os perfis de carga das diversas instalações, elaborados numa base média anual, mensal e semanal.

✓ **Determinação dos consumos por vetores, processos e equipamentos**

A execução da presente tarefa pressupôs o levantamento das características técnicas e períodos típicos de funcionamento dos principais sistemas consumidores de energia, assim como a concretização de medições pontuais, com recurso a analisadores de rede, tendo em vista a aferição dos respetivos consumos médios dos mesmos.

Os resultados e informações decorrentes dos pontos anteriores, juntamente com a quantificação dos consumos de energia das diversas instalações permitiu obter estimativas das desagregações dos consumos de energia anuais, por processos de tratamento e/ou por equipamento.

✓ **Relação entre consumo energético e a produção e/ou nível de funcionamento da instalação**

A avaliação da existência de uma relação entre o consumo de energia e respetivas variáveis independentes levou a que fosse necessário proceder à recolha de um conjunto de variáveis, tais como volume afluente e qualidade do afluente, junto das diversas entidades. A recolha e análise deste conjunto de dados permitiu a concretização de estudos estatísticos para cada uma das instalações tendo em vista a identificação e validação de eventuais correlações as mesmas e os consumos de energia.

Para cada instalação procurou-se caracterizar os respetivos consumos de referência e respetiva metodologia de ajuste por forma a viabilizar a aferição da evolução do desempenho energético da instalação em pudessem vir a ser implementadas, em custos e consumos evitados.

Por fim, foi ainda avaliada a definição de um produto ou conjunto de produtos tendo em vista o cálculo de consumos específicos de energia e/ou outros indicadores de desempenho relevantes para as infraestruturas em causa.

✓ **Identificação de hipóteses de melhoria dos rendimentos energéticos e proposta de medidas de utilização racional de energia**

Tendo em conta os conhecimentos adquiridos durante o trabalho de campo, assim como os resultados decorrentes do conjunto de ações anteriormente descritas foi possível estudar e identificar hipóteses de melhoria da utilização de energia. Para tal, foi sugerido um programa de ações de implementação de medidas de racionalização de energia onde foi apresentada informação relacionada com a poupança expectável, em consumos e custos evitados, assim como o cálculo de indicadores financeiros.

✓ **Avaliação sumária do processo de tratamento da ETAR por etapa de tratamento, com identificação das potencialidades de melhoria processuais passíveis de implementação**

Tendo por base a informação recolhida junto das entidades durante a visita técnica foi possível elaborar diagramas gerais de cada ETAR, com identificação de todas as operações unitárias existentes, entradas e saídas em termos de materiais, energia, água e águas residuais, e ainda uma breve descrição do esquema de tratamento existente.

Com a informação acima referida, e tendo em conta as variáveis relacionadas com os recursos utilizados (energia elétrica), a eficiência de remoção das cargas poluentes, sólidos e odores, e a respetiva satisfação das necessidades procedeu-se à elaboração de uma análise funcional, tendo como objetivo o cálculo do Valor¹ das diversas instalações. Este indicador permitiu aferir o desempenho global de cada instalação tendo em conta os recursos utilizados e a satisfação das necessidades no âmbito da sua atividade.

Tendo em conta os limites de descargas, o destino final das águas tratadas e as características de cada uma das instalações, foram sugeridas direções a tomar quanto a eventuais medidas de melhoria de âmbito processual relacionando-as, sempre que possível, com os principais benefícios decorrentes da sua aplicação, em termos de redução de custos ou de recursos.

✓ **Proposta de esquema operacional de gestão de energia**

Por fim, foram definidas linhas orientadoras para uma eventual implementação ou melhoria de um esquema operacional de Gestão de Energia, tendo em consideração as especificidades das instalações em análise e os requisitos preconizados pela Norma NP EN ISO 50001.

As ações desenvolvidas no âmbito dos trabalhos realizados, apresentadas anteriormente, para cada uma das instalações em estudo, permitiram a obtenção de um conjunto de informações que possibilitou um maior conhecimento da forma como estas operam, assim como a forma como a energia é consumida ao longo do seu processo de tratamento. Ao longo deste processo, e tendo em conta o seu carácter independente não foi possível efetuar comparações entre instalações.

É neste sentido que surge a necessidade de, nos capítulos subsequentes, utilizar-se parte dos dados recolhidos junto das diversas entidades de forma a efetuar comparações pertinentes entre instalações, tendo em atenção fatores relacionados com a sua dimensão, com as tecnologias utilizadas no seu processo de tratamento e com as cargas poluentes tratadas.

¹ Catarino, J., Henriques, J.J., Maia, A., Alexandre, J., Camocho, D., Rodrigues, F. (2007). Manual Valor Sustentável: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P (INETI)

As medições efetuadas e os restantes exercícios desenvolvidos durante o trabalho de campo serviram de base para efetuar novas desagregações dos consumos de energia, semelhantes e transversais ao conjunto das instalações em análise, permitindo uma análise conjunta das mesmas. O tratamento conjunto dos dados em causa permite a obtenção de um conhecimento mais aprofundado sobre a forma como diversos fatores influenciam os consumos energéticos, gerando informação que poderá contribuir para a obtenção de ferramentas que possibilitem a aferição dos seus níveis de desempenho energético.

Serão determinados e analisados um conjunto de indicadores energéticos, habitualmente utilizados em instalações industriais e outros comumente utilizados neste sector, assim como a relação existente entre os consumos e as variáveis usualmente utilizadas na caracterização da carga poluente existente e na quantidade de volume de água de forma a verificar a adequabilidade e validade dos mesmos.

6. ANÁLISE E TRATAMENTO DE RESULTADOS

O conjunto de ações desenvolvidas no âmbito dos trabalhos realizados, apresentadas no capítulo anterior, permitiu recolher informação pertinente relacionada com o conjunto das etapas processuais presentes, em cada uma das infraestruturas em análise, mas também à recolha de dados relacionados com as condições de uso e consumo de energia elétrica em cada uma delas. A informação em causa permitiu, nos pontos subsequentes, proceder à caracterização dos processos de tratamento existentes nas diversas instalações, assim como as características do afluente, dando especial destaque à quantidade tratada e à carga poluente a montante e jusante do processo de tratamento. No presente capítulo e tendo em consideração as ações realizadas no âmbito dos diagnósticos energéticos, foi possível tratar e compilar dados relacionados com a distribuição dos consumos energéticos por etapa processual analisando, sempre que possível, os consumos afetos a processos específicos permitindo comparações entre instalações.

6.1 Caracterização genérica das instalações

Na Tabela 5.1, apresentada no capítulo anterior, destaca-se a grande variabilidade da amostra em análise. É importante referir que apesar das instalações em análise possuírem o mesmo tipo de tratamento - Lamas Ativadas - existem alguns fatores como a capacidade de tratamento (m^3/dia) e a população servida que levam a que cada instalação tenha especificações muito próprias. Esta particularidade levou a que fossem definidas tipologias com base na população servida, tendo em vista o horizonte de projeto, de forma efetuar comparações entre instalações com características semelhantes. Note-se que os habitantes equivalentes, ou equivalente populacional de uma ETAR representa a quantidade de poluição orgânica de um efluente líquido que é gerado por uma pessoa, a qual corresponde a uma carga orgânica biodegradável com uma carência de CBO de 60g de oxigénio por dia. Este indicador permite “converter” a carga orgânica de determinado efluente, bruto ou tratado, em habitantes “equivalentes” e assim inferir sobre a quantidade de habitantes que determinado efluente representa em termos de carga orgânica ($1 \text{ hab.eq} = 60\text{g CBO/dia}$).

A pesquisa bibliográfica efetuada, normalmente referente aos EUA, levou a que a definição de uma parametrização que permitisse a separação das ETAR em função da sua dimensão se revelasse um exercício de difícil execução. Este aspeto tem que ver com as diferenças de dimensão existentes no universo de instalações e a possibilidade de uma ETAR de pequenas dimensões num determinado país não obter a mesma definição em Portugal. Desta forma, e tendo em conta a necessidade de parametrizar as instalações em estudo, foi utilizada a parametrização contida no Decreto-Lei nº152/97 que estabelece a quantidade mínima de amostras necessárias ao controlo do cumprimento dos requisitos aplicáveis de descarga de águas residuais, recolhidas em função das dimensões das estações de tratamento para Portugal, tal como apresentado na tabela seguinte.

Tabela 6.1 - Parametrização utilizada na definição de tipologias de ETAR

Tipologia	População equivalente (e.p)
ETAR Pequena	2.000 – 9.999
ETAR Média	10.000 – 49.999
ETAR Grande	>50.000

Tendo em conta a parametrização definida, destaca-se a existência de 2 ETAR de pequena dimensão, 5 de média dimensão e 6 de grande dimensão. Na figura seguinte estão representadas as ETAR afetas a cada tipologia.

Tabela 6.2 - Separação das ETAR por tipologia

ETAR Pequena			ETAR Média			ETAR Grande		
2.000 – 9.999 hab.eq.			10.000 – 49.999 hab.eq.			>50.000 hab.eq.		
	Habitantes equivalentes			Habitantes equivalentes			Habitantes equivalentes	
	Projeto	Atuais		Projeto	Atuais		Projeto	Atuais
ETAR A	6.330	725	ETAR C	14.000	10.530	ETAR H	60.000	18.000 – 30.000
ETAR B	8.150	8.000	ETAR D	17.500	13.600	ETAR I	68.000	10.145
			ETAR E	25.000	12.500	ETAR J	79.800	45.000
			ETAR F	30.000	17.000	ETAR K	94.000	17.700
			ETAR G	44.000	16.000 – 25.000	ETAR L	130.000	153.000
						ETAR M	153.880	40.000

Tendo em conta a capacidade de tratamento de cada uma das ETAR é importante destacar o facto de uma delas (ETAR “L”), já ter ultrapassado a sua capacidade de tratamento e da ETAR “B” já estar a operar à sua capacidade máxima, tal como apresentado na Tabela 5.1.

No conjunto das ETAR em análise destaca-se o facto de três delas (“H”, “K” e “M”) apresentarem volumes de tratamento inferiores em 30% da capacidade inicialmente projetada. Esta particularidade está associada à sua recente construção e ao facto de ainda não terem sido efetuadas todas as interligações à redes de tratamento de cada uma. Do ponto de vista energético, esta situação poderá levar a que a ETAR seja menos eficiente, uma vez que grande parte dos equipamentos e respetivos órgãos da instalação estarão a funcionar abaixo do seu ponto ótimo.

Quantos aos parâmetros de descarga, apesar das diferentes capacidade de tratamento, da sua localização e de estarem sujeitas a diferentes cargas poluentes, todas as instalações terão de obedecer aos limites legais de descarga presentes no Decreto Lei nº152/97, tal como referido no Capítulo 4. Realça-se que, apesar das diferenças existentes e respetiva dispersão geográfica, os parâmetros de descarga limite revelam-se os mesmos para a globalidade das instalações analisadas, tal como apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Separação das ETAR por tipologia

	CBO (mg O ₂ /l)	CQO (mg O ₂ /l)	SST (mg/l)
Valor limite de descarga	25	125	35

Existem, no entanto, parâmetros, tais como o azoto total e o fósforo total, que apesar de não constituírem requisitos de descarga deverão ser analisados.

6.2 Caracterização do Processo Produtivo

Como referido anteriormente, as instalações em causa possuem uma grande variabilidade, no que se refere à capacidade de tratamento e população servida. Estas diferenças refletem-se, de igual forma, quando são abordadas as especificidades relacionadas com os equipamentos utilizados nos respetivos processos. Na Tabela 6.3 é apresentada uma matriz com a informação dos processos existentes

Em virtude das características do local, da população servida, do tipo de afluente e das exigências legais impostas, as instalações podem utilizar processos complementares, muitas vezes diferentes, ainda que o processo base de tratamento seja o mesmo. Esta particularidade coloca desafios relevantes nos processos de análise conjunta entre instalações.

Tendo em conta o conjunto das instalações em análise é importante referir algumas particularidades de grande relevância para os consumos das ETAR. No que se refere ao subprocesso de maior intensidade energética, arejamento do tanque biológico, destaca-se o facto de, na amostra em análise, 53,8% das instalações apresentarem arejadores verticais e cerca de 38,5% utilizarem sobreprensos de arejamento com ar difuso. É importante realçar o facto de, os restantes 7,7% referirem-se unicamente à ETAR “F”, que utiliza um mecanismo de arejamento baseado numa tecnologia muito própria, compacta, o que inviabiliza a inserção desta instalação numa das categorias acima referidas (arejamento através de arejadores verticais ou por ar difuso). A diferença no tipo de arejamento ganha especial relevância no panorama global dos consumos de uma instalação uma vez que, tal como referido no Capítulo 4, as eficiências de arejamento a si associadas são consideravelmente distintas.

Naquilo que se refere ao processo de desodorização, e tendo em conta a informação contida na Tabela 6.3, cerca 61,5% da amostra em análise possui desodorização química, biológica ou as duas em conjunto. Tal como referido anteriormente este processo acarreta elevados consumos de energia elétrica para as instalações e encontra-se instalado, na amostra em análise, em ETAR construídas recentemente e/ou com forte contribuição industrial (p.e. ETAR “L”)

Quanto à digestão anaeróbia, e respetiva valorização do biogás produzido, para produção elétrica e de calor através de um sistema de cogeração, é apenas utilizada em 3 de 13 das ETAR contidas na amostra analisada. A energia elétrica produzida através desta solução é utilizada em regime de autoconsumo levando a que a dependência dos comercializadores de energia seja menor.

Do ponto de vista da automação e da operação em função das necessidades, o conjunto de instalações mostra-se bastante heterogéneo em consequência dos diferentes anos de início de atividade. Este aspeto ganha especial destaque em processos com consumos mais intensivos onde as poupanças conseguidas e a precisão de controlo levam a que haja uma maior aquisição de informação que permita uma utilização mais racional da energia. Destaca-se, a título de exemplo, a inexistência de mecanismos de controlo do processo de arejamento em função das necessidades (necessidades de oxigénio do tanque e mistura do afluente), tais como potencial *redox* ou oxigénio dissolvido, em 53,8% das ETAR analisadas.

Na Figura 6.1 apresenta-se o diagrama representativo das diversas etapas de tratamento afetas a cada uma das instalações em análise. A introdução de outros processos, que não contribuam de forma tão significativa para a caracterização das ETAR, foi excluída com o objetivo de simplificar o processo de análise.

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

Tabela 6.3 - Etapas processuais afetas a cada instalação

		ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M	
Tratamento Preliminar	Gradagem	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Desarenamento e Desengorduramento	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Floculação							x						x	
Tratamento Primário	Decantação Primária						x	x	x	x		x	x	x	
Tratamento Secundário ou Biológico	Arejamento	Lamas ativadas (arejadores verticais)	x	x	x			x		x	x		x		
		Lamas ativadas (Bolha fina)				x	x			x			x		x
		Sistema Compacto (p.ex. Biofor)						x							
	Decantação Secundária	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	
Tratamento Terciário	Desinfecção	Micro Tamisagem		x	x			x	x				x		
		Filtragem Areia					x			x			x	x	
		Hipoclorito de Sódio									x			x	x
		UV	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Tratamento de Lamas	Espessamento de Lamas	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	
	Desidratação	Unidade móvel	x												
		Centrifuga				x	x	x	x	x		x	x	x	x
		Filtro de Banda		x	x					x		x			
	Desodorização	Desodorização Biológica												x	
		Desodorização Química				x	x				x	x	x	x	x
	Digestão Anaeróbia e Cogeração							x					x	x	

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

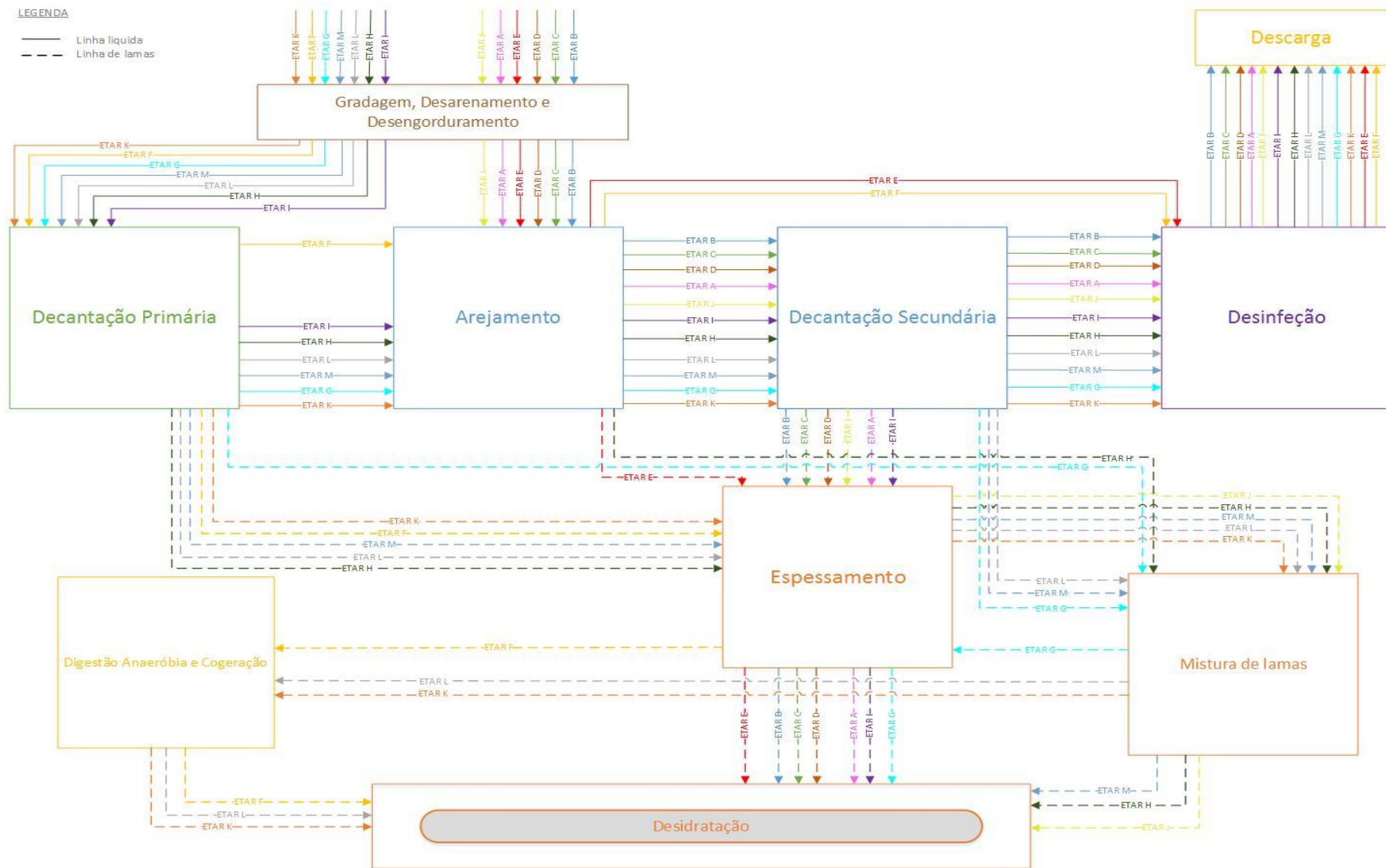


Figura 6.1 - Fluxograma das instalações analisadas

6.3 Dados de Produção

Para efeitos de caracterização das instalações em análise e definição de uma potencial metodologia de aferição do respetivo desempenho energético foram recolhidos e tratados os seguintes dados de produção: Volume de afluente tratado, carga poluente (CBO, CQO e SST) e produção de lamas desidratadas. Os parâmetros considerados referem-se aqueles mais comumente utilizados para efeitos de controlo do processo de tratamento.

Os dados mensais e anuais de cada uma destas variáveis, afetas a cada uma das instalações em estudo encontram-se representados nos Anexo II a VII do presente documento. O código de cores utilizado nas figuras existentes no presente capítulo está relacionado com as dimensões definidas anteriormente, sendo a cor laranja referente a instalações de pequena dimensão, o cinzento às de média e a verde as ETAR de grande dimensão.

6.3.1 Quantidade e Qualidade do Afluente

- **Quantidade de Afluente**

A aquisição dos dados relativos ao volume de água tratada pelas instalações é contabilizada através de medidores (p.e. canal de Parshal) instalados à entrada da ETAR e que procedem à recolha e respetivo envio da informação para um sistema de aquisição de dados. Note-se que os valores de volume de afluente mensal tratado, obtido através do sistema de aquisição de dados existente nas instalações, referem-se ao período compreendido entre janeiro e dezembro de 2013.

Na figura seguinte são apresentadas os volumes anuais de água residual tratada por cada instalação (m^3/ano), obtidos através da soma dos valores mensais reportados.

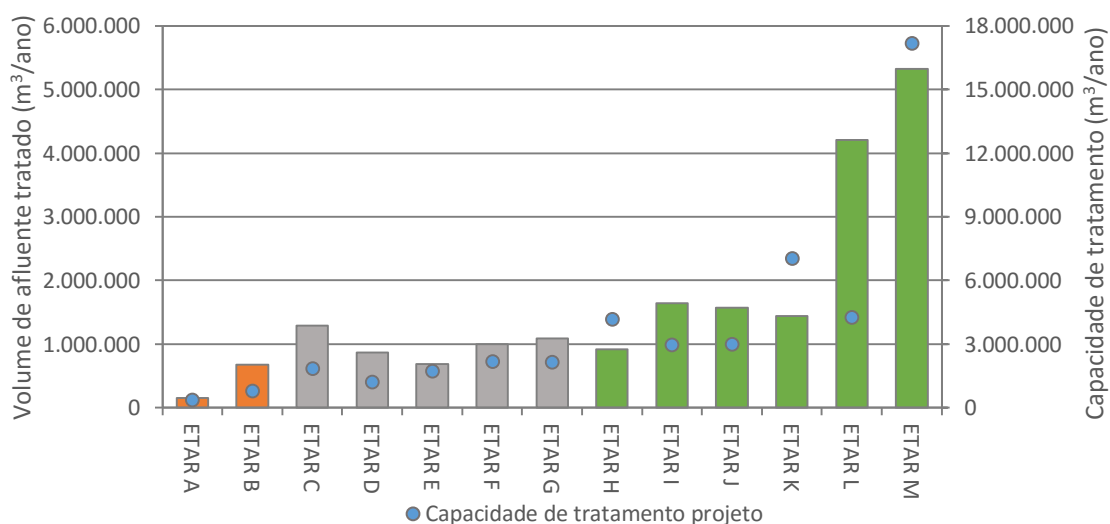


Figura 6.2 - Volume anual de água residual tratada por instalação (m^3/ano)

Da análise à figura anterior destaca-se a diferença de volumes de água tratada das ETAR “L” e ETAR “M” com as restantes presentes na amostra. Esta variação depende, em grande parte, da população servida, da atividade industrial da zona em que as instalações estão inseridas e do facto da rede de águas pluviais estar, muitas vezes, interligada à rede tratamento de águas residuais.

Destaca-se a existência de ETAR de média dimensão, tal como a ETAR “C”, que trata anualmente volumes de água mais elevados que ETAR de grande dimensão, tal como a ETAR “H”. Este facto

resulta de vários aspetos, dos quais se evidenciam a forte contribuição pluvial, que existe na ETAR “C”, e que leva a que sejam introduzidos no sistema grandes volumes de água pluvial, mas também o facto da ETAR “H” ser uma instalação construída recentemente e que ainda não serve grande parte da população para a qual foi projetada, contrariamente ao que acontece na ETAR “C”.

Uma outra questão importante quando os volumes de água tratada são analisados é o equivalente populacional. Duas ETAR com populações equivalentes iguais podem ter volumes de água tratada bastante diferentes, uma vez que esta depende da carga poluente típica de uma determinada população e/ou atividade. Note-se que as instalações com grande contribuição industrial, onde as águas residuais possuem uma elevada carga poluente têm, tendencialmente, populações equivalente mais elevadas do que outras que apenas servem áreas residenciais. Na amostra em análise, este aspeto é evidente para as ETAR “M” e “L”. Estas duas instalações trataram volumes de águas residuais similares, contudo a população equivalente atual das duas situa-se nos 40.000 habitantes equivalentes para a “M” e 153.000 para a “L” (elevada contribuição industrial).

É ainda importante destacar a grande diferença de volumes de água residual tratada pelas ETAR “L” e “M”, mesmo quando comparadas com as restantes instalações denominadas por ETAR de grandes dimensões.

- **Qualidade do Afluente**

A análise da carga poluente presente no afluente bruto e no efluente tratado é feita com base em valores de Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO), Carência Química de Oxigénio (CQO) e Sólidos Suspensos Totais (SST). A descarga do efluente tratado pressupõe o cumprimento das exigências legais presentes na “Licença de Utilização de Recursos Hídricos - Rejeição de Águas Residuais” emitida pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA) para cada instalação.

Os dados dos parâmetros em causa são aferidos mensalmente, com base em análises laboratoriais, através dos quais é determinada a concentração de carga poluente (mg/l) presente nas amostras referentes a volumes brutos e tratados da instalação. Por vezes, em algumas instalações, as análises efetuadas às carga poluentes são feitas mais do que uma vez por mês, o que, de forma a facilitar o tratamento da informação, leva a que os dados utilizados na avaliação mensal sejam baseados na sua média.

Com o objetivo de calcular a quantidade anual de carga poluente removida por cada instalação, foi determinada a quantidade mensal de cada parâmetro. O cálculo efetuado para determinação da carga poluente mensal foi elaborado com base nos resultados relativos às amostras recolhidas, em mg/l, e com o volume afluente à ETAR, de acordo com a equação seguinte.

$$Carga\ poluente\ \left(\frac{kg}{mês}\right) = \frac{Concentração\ da\ carga\ poluente\ \left(\frac{mg}{l}\right)}{1000} \times Volume\ de\ água\ tratada\ \left(\frac{m^3}{mês}\right) \quad (9)$$

A diferença entre a carga poluente (CBO, CQO ou SST), em kg/mês, à entrada e à saída da instalação, permitiu quantificar a carga poluente removida de cada um dos três parâmetros analisados, tal como apresentado na Equação 9.

$$Carga\ Poluente\ Removida\ \left(\frac{kg}{mês}\right) = Carga\ Afluente\ \left(\frac{kg}{mês}\right) - Carga\ Efluente\ \left(\frac{kg}{mês}\right) \quad (10)$$

Este exercício foi efetuado para o conjunto dos 12 meses do ano, correspondendo o valor anual removido para cada uma das instalações analisadas ao somatório dos valores mensais, de acordo com a equação seguinte.

$$Carga\ Anual\ Removida = \sum_{i=1}^{12} Carga\ Poluente\ Removida \left(\frac{kg}{mês} \right) \quad (11)$$

Na figura 6.4 estão representadas as quantidades de carga poluente removida para cada uma das instalações, numa base anual.

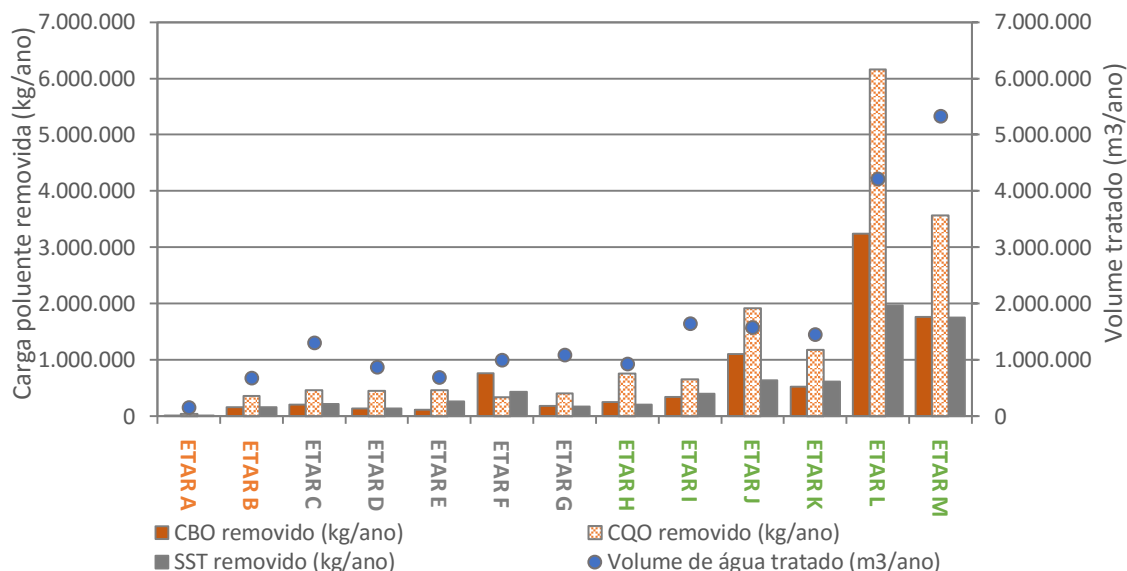


Figura 6.3 - Quantidade de carga poluente removida (kg/ano)

Da análise à figura anterior é possível verificar a tendência da carga de CQO removida ser sempre mais elevada que as restantes cargas poluentes removidas, excetuando o caso da ETAR “F”. Nesta instalação, a relação CQO/CBO é de 0,4, definida como baixa relação (Sperling, 2007), o que é indicador de uma elevada fração biodegradável. À medida que as etapas de tratamento ocorrem, o rácio CQO/CBO vai sofrendo alterações uma vez que a água residual vai sendo progressivamente tratada e, por conseguinte, atingindo valores de qualidade mais elevados. (Sperling, 2007)

As condições de carga a que as instalações estão sujeitas variam em função de vários aspetos, estando normalmente relacionados com descargas efetuadas por indústrias localizadas na zona em que as ETAR se encontram e à influência das águas pluviais que, devido à sua interligação indevida à rede de saneamento, provocam alterações significativas (diluição) na concentração de carga orgânica afluente à ETAR. Tendo em conta a periodicidade com que estas amostras são efetuadas (1 a 2 vezes por mês), bem como a grande variabilidade associada à carga poluente afluente às instalações, é possível afirmar que os valores obtidos através das análises efetuadas, por vezes, possam não ser representativos de um valor médio respeitante ao mês em questão. A título de exemplo são apresentadas na tabela 6.4 as análises efetuadas na ETAR “E”, para o mês de Junho de 2013, onde é visível a grande diferença de concentrações de (CBO, CQO e SST) existente entre períodos distintos do mês.

Tabela 6.4 - Análises periódicas de carga poluente afluente à ETAR – ETAR “E”

	CBO (mg/l)	CQO (mg/l)	SST(mg/l)
4-07-2013	1.100	3.360	3.300
11-07-2013	800	2.486	2.500
18-07-2013	240	482	160
25-07-2013	380	833	360

Destaca-se o facto dos valores enunciados na tabela anterior referirem-se às medições efetuadas pelas instalações no âmbito do seu programa de autocontrolo, referido na licença de utilização dos recursos hídricos, não sendo utilizadas no âmbito do programa de monitorização das descarga no meio recetor.

Na tabela seguinte são apresentados alguns valores elucidativos das concentrações de cargas poluentes afetos a cada uma das instalações, no âmbito do programa de monitorização, obtidos através das análises periódicas efetuadas mensalmente. Os parâmetros designados por máximo e mínimo referem-se ao maior e menor valores registados no conjunto dos meses em análise (janeiro a dezembro 2013). Os valores médios e respetivo desvio padrão, são determinados com base na média mensal das concentrações de cada um dos parâmetros analisados.

Tabela 6.5 - Concentrações de cargas poluentes registadas (mg/l)

		ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
CBO (mg/l)	Máx	380	393	335	410	530	1536	287	480	500	1540	610	1086	465
	Min	18	125	61	16	17	283	76	170	26	200	255	396	196
	Méd	199	259	198	213	274	910	182	325	263	870	433	741	330
	D. Pad.	181	134	137	197	257	627	105	155	237	670	178	345	135
CQO (mg/l)	Máx	687	918	848	1100	4200	610	726	1300	1355	2700	1450	2406	978
	Min	52	281	179	220	49	255	186	573	68	445	544	781	453
	Méd	370	599	513	660	2125	433	456	937	712	1573	997	1594	715
	D. Pad.	318	318	334	440	2076	178	270	364	644	1128	453	813	262
SST (mg/l)	Máx	510	335	553	330	3600	945	437	670	900	855	945	1149	499
	Min	31	129	66	24	16	181	59	120	50	110	181	249	215
	Méd	271	232	309	177	1808	563	248	395	475	483	563	699	357
	D. Pad.	240	103	243	153	1792	382	189	275	425	373	382	450	142

Max: máximo; Min: mínimo; Méd: média; D.Pad: Desvio Padrão

Da análise à tabela anterior destacam-se os elevados valores do desvio padrão referente ao conjunto dos dados em análise. Esta particularidade advém do facto da carga neste tipo de instalações variar em função de fatores relacionados, com a sazonalidade ou com a influência das águas pluviais originando valores de carga poluente consideravelmente variável ao longo do ano.

De seguida é apresentada, a título de exemplo, a evolução dos parâmetros qualitativos analisados no volume afluente à ETAR “L”, calculados numa base mensal, juntamente com o seu volume afluente.

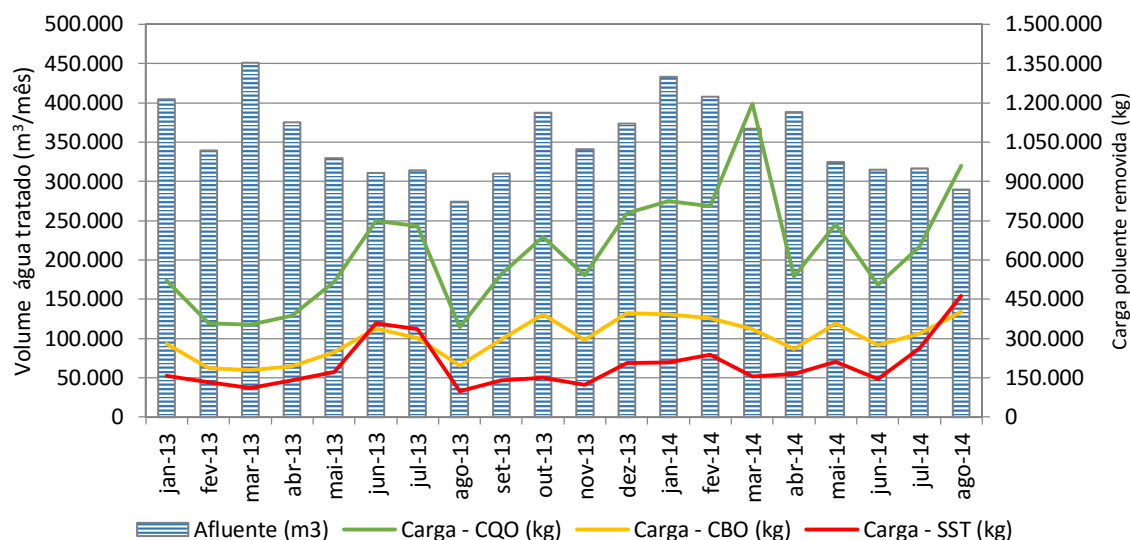


Figura 6.4 - Volume e carga poluente das águas residuais afluentes à ETAR (Schneider Electric, 2015)

Os dados em análise evidenciam uma grande variação, ao longo do ano, dos parâmetros em questão, bem como o facto de nem sempre se conseguir relacionar o aumento da carga poluente com o aumento da quantidade de águas residuais afluentes à mesma. Um exemplo deste aspeto é o facto de em Março de 2013, o volume de água tratada ter sido o mais elevado registado no período em análise e os valores dos três parâmetros analisados situarem-se abaixo dos valores médios registados no restante período. Este facto poderá ser explicado, em parte, pela interligação da rede de águas pluviais da zona em que a ETAR está inserida, originando uma diluição da carga poluente presente no volume de água a tratar ou, simplesmente, devido ao facto da amostra recolhida não ser representativa das condições de carga existentes na ETAR para o mês em causa.

6.3.2 Produção de Lamas

Em resultado do tratamento de águas residuais são obtidas grandes quantidades de lamas. A sua elevada produção, os cuidados inerentes ao seu tratamento e o encaminhamento para destino final, levam a que este produto comporte grandes encargos para as entidades, tal como evidenciado no Capítulo 3. Uma vez que representa um produto resultante do processo de tratamento das ETAR, e tendo em conta todas as problemáticas associadas ao seu tratamento e respetivos custos associados, as lamas estão sujeitas, tal como o sucede com os volumes de água residual tratados e com os indicadores de carga poluente, a uma contabilização periódica mensal.

A contabilização deste produto ocorre numa base mensal e à saída do processo de desidratação, previamente ao seu encaminhamento para destino final.

A informação recolhida, junto das entidades que gerem as ETAR, contempla dois valores relativos à quantidade de lamas produzidas. O primeiro refere-se ao parâmetro “lamas desidratadas”, em que é contabilizada toda a massa proveniente do mecanismo de desidratação (filtro de banda ou centrífuga) e que é encaminhada para o seu destino final, e o segundo referente à “matéria seca” cujo seu cálculo é feito com base na análise à sicidade (percentagem de matéria seca) e tem como objetivo a avaliação do nível de desidratação atingido.

Na figura seguinte são apresentadas as quantidades anuais de lama desidratada produzida referentes ao conjunto das ETAR em análise e, conseqüentemente, encaminhadas para destino final.

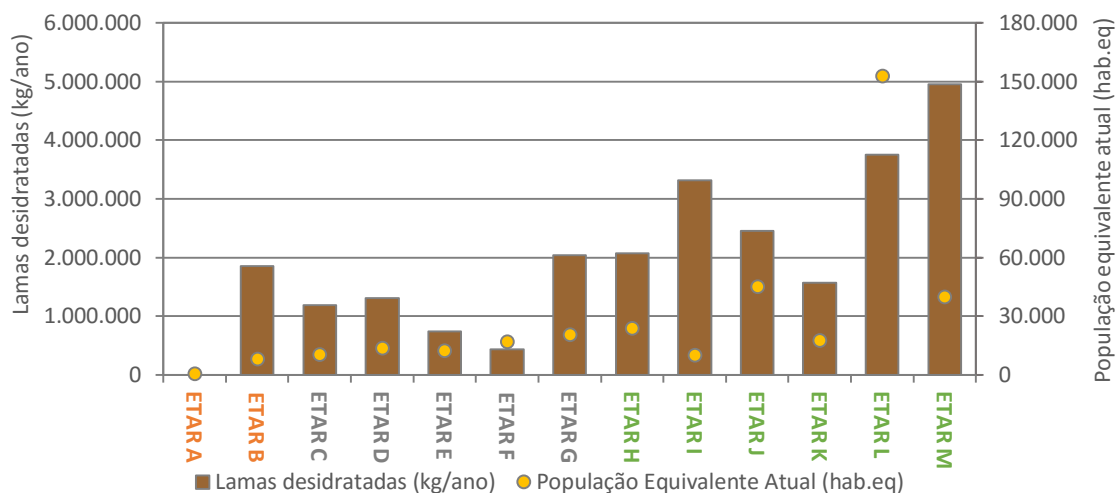


Figura 6.5 - Produção anual de lamas desidratadas

Na análise à Figura 6.5 é visível a ausência de dados relativos à quantidade de lama produzida pela ETAR “A”. Este facto sucede em virtude do seu processo de desidratação ser realizado através de uma unidade de desidratação móvel, como é referido na Tabela 6.5, impossibilitando a quantificação da lama produzida na instalação.

A figura anterior permite verificar que a ETAR “B” produz uma quantidade bastante superior ao conjunto de ETAR com um equivalente populacional bastante superior ao seu. Este facto está relacionado, em parte, com a descarga de elevadas quantidades de afluente que advém da recolha das fossas sépticas da região que leva a que sejam produzidas quantidades de lama bastante superiores relativamente a uma instalação sem esta influência.

Os dados em análise revelam uma outra questão pertinente e que está relacionada com as quantidades reduzidas de lamas que a ETAR “F” produz relativamente às restantes instalações que compõem a amostra. Apesar do seu equivalente populacional atual não ser dos mais baixos (17.000 habitantes equivalentes) e sendo considerada uma ETAR de média dimensão (Decreto-Lei 152/97), a sua produção de lamas é a mais reduzida de todas. Note-se que este aspeto poderá estar, em parte, relacionado com a influência que o processo de digestão anaeróbia tem na redução do volume de lama produzida (Di Bernardino, 2001). Quanto à ETAR “K”, que também contempla digestão anaeróbia, apesar de definida como uma ETAR de grande dimensão, revelou-se a instalação com menor produção de lamas, quando comparada com as restantes pertencentes a esta categoria.

6.4 Uso e Consumo de Energia

Nos pontos subsequentes caracterizam-se as condições de uso e consumo de energia elétrica das instalações em estudo, através da análise à distribuição tarifária dos consumos, do perfil de consumos da instalação (diagrama de carga) e da desagregação dos consumos de energia por etapa processual referente à globalidade das instalações.

Para efeitos da presente análise foram considerados os dados disponibilizados através de faturas de energia elétrica e de outros registos do fornecedor (sistema de telecontagem), mas também os dados resultantes das medições e informação recolhida, durante o trabalho de campo (diagnósticos energéticos realizados no âmbito do procedimento concursal “PIEENV2013 – ETAR Lote LVT”).

Em conjunto com os dados analíticos referentes à qualidade do afluente, os consumos de energia servem de base para os exercícios de avaliação do desempenho energético das instalações e de desenvolvimento de metodologia analítica de aferição do mesmo, apresentados nos capítulos seguintes da presente dissertação.

6.4.1 Consumos de Energia Elétrica

De forma a proceder a uma análise cuidada relacionada com os consumos globais de energia do conjunto das ETAR analisadas, foram utilizados dados obtidos diretamente das faturas disponibilizadas por cada uma das entidades relativas ao período compreendido entre janeiro e dezembro de 2013. Na figura seguinte são apresentados os consumos totais de energia elétrica incluindo a energia produzida através dos sistemas de cogeração.

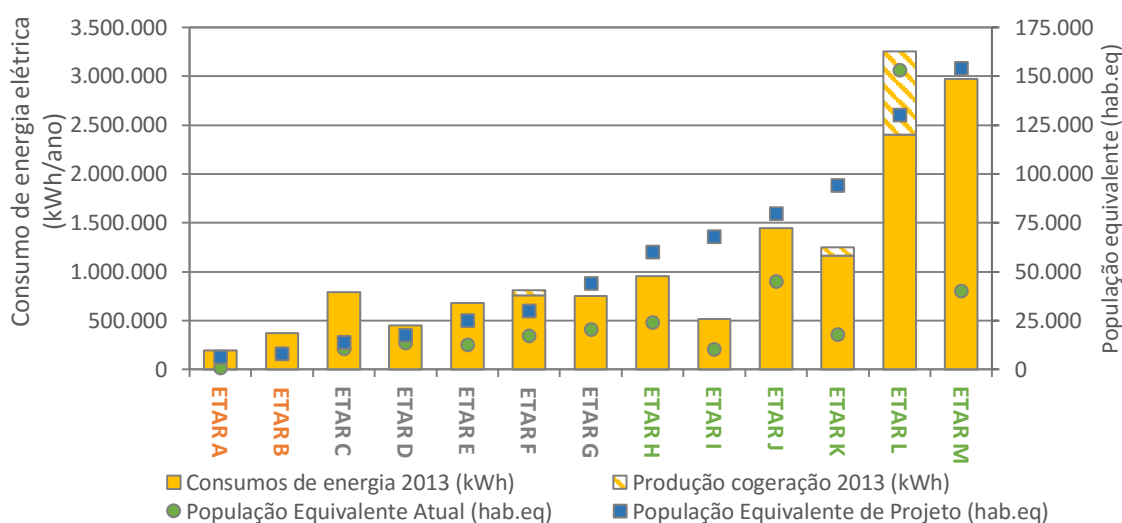


Figura 6.6 - Consumo anual de energia elétrica por instalação (incluindo energia produzida através da cogeração)

Da análise à figura anterior observa-se a existência de apenas três instalações (“F”, “K” e “L”) com produção de energia elétrica através de sistemas de cogeração no ano em análise. A contribuição da energia produzida para o consumo global de cada uma das instalações situou-se nos 6,7% para a ETAR “F” e “K” e 26,2% para a ETAR “L”.

No conjunto de instalações definidas como ETAR de grandes dimensões destaca-se a considerável diferença de consumos de energia existente entre as ETAR “L” e ETAR “M” e as restantes ETAR de grandes dimensões. A ETAR “I”, apesar de ser classificada como uma instalação de grandes dimensões revela consumos de energia consideravelmente mais baixos que as restantes ETAR próximas da sua população equivalente. A contribuir para este facto poderá estar associada a sazonalidade a que a instalação está sujeita o que leva a que a população servida fora dos meses de verão seja bastante mais reduzida e também o facto da atual população equivalente estar consideravelmente abaixo da população equivalente de projeto.

6.4.2 Perfil de Consumos

Os perfis de consumos de energia elétrica foram definidos com base nos dados disponibilizados nas faturas de energia (períodos tarifários), apresentados no Anexo VIII, e pelo serviço de telecontagem dos fornecedores de energia das instalações.

Na figura seguinte apresenta-se a distribuição percentual anual dos consumos de energia elétrica por classe tarifária com vista a uma análise mais pormenorizada, e de fácil interpretação, do peso de cada classe tarifária nos consumos associados a cada instalação.

Quanto ao período de funcionamento das ETAR em análise, estas operam de forma contínua (24h/dia) durante todo o ano, pelo que não existe nenhum tipo de sazonalidade para além daquela afeta à variação sazonal das cargas poluentes.

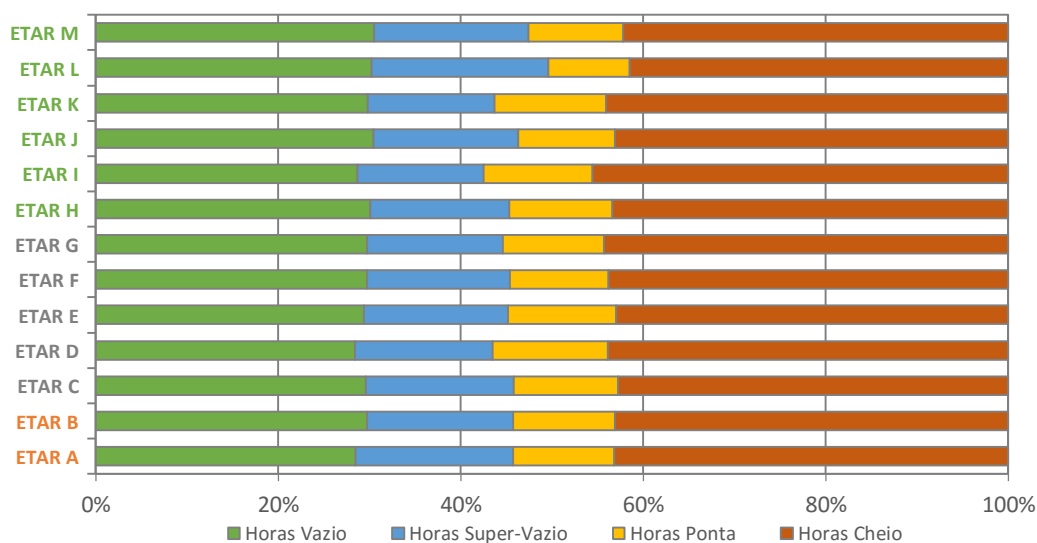


Figura 6.7 - Distribuição percentual dos consumos por classe tarifária

Da análise à figura anterior, destaca-se o facto do perfil de distribuição de consumos por classe tarifária ser bastante similar entre todas as instalações, apesar das diferenças processuais existentes. Apesar da Figura 6.7 permitir determinar as parcelas correspondentes aos consumos de energia em cada um dos períodos tarifários, o facto de a cada período tarifário estar associado um número de horas consideravelmente distinto não permite revelar em que altura é que a potência elétrica absorvida é mais elevada.

De forma a conseguir visualizar os períodos do dia onde cada uma das ETAR confere valores de potência absorvida mais elevada, apresentam-se, na Figura 6.9, os diagramas de carga médios anuais de cada uma das instalações. Estes foram definidos com base nos dados disponibilizados pelo serviço de telecontagem dos fornecedores de energia elétrica com um período de integração de dados de 15 minutos.

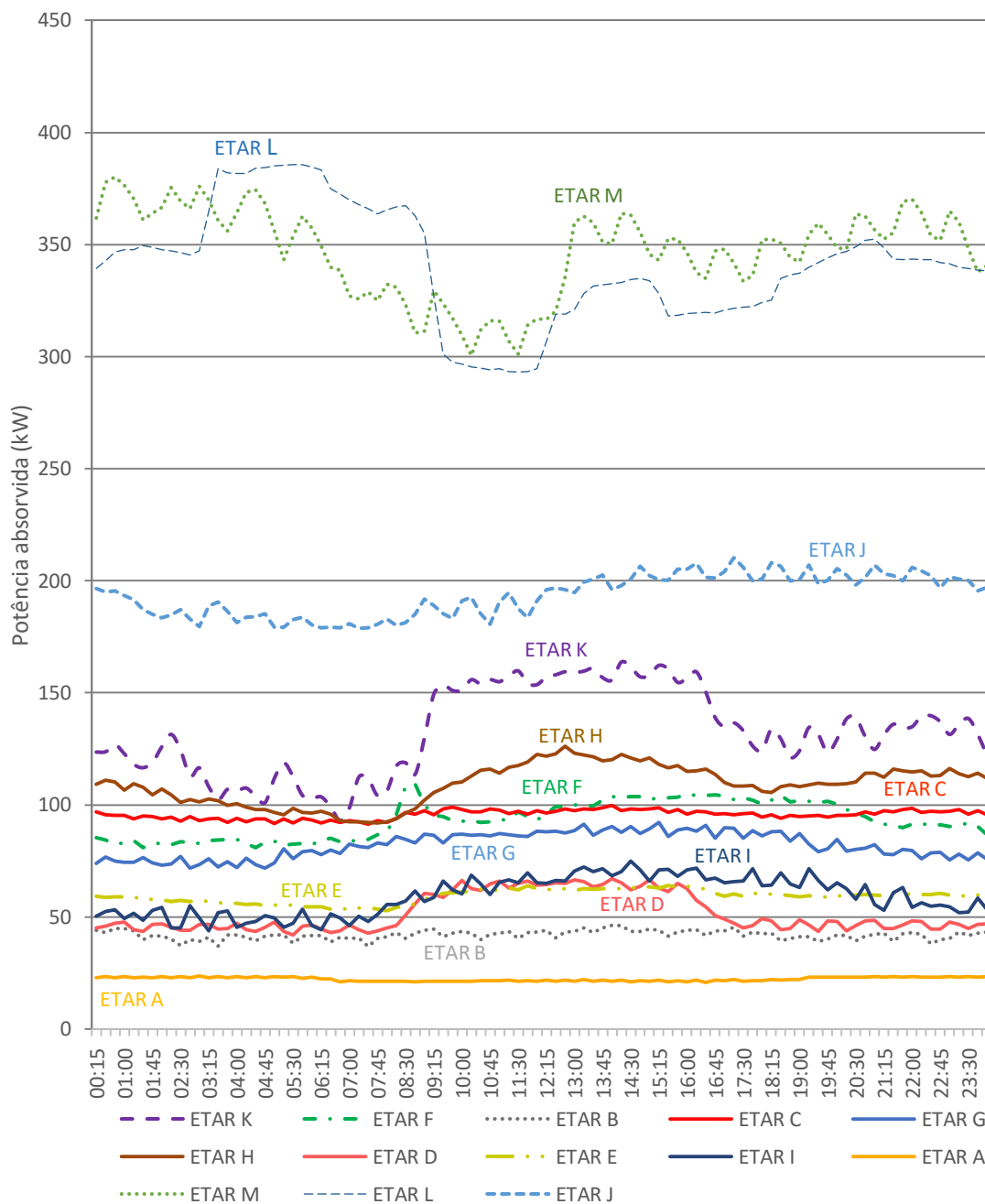


Figura 6.8 - Diagramas de carga médios anuais

A evolução dos diagramas de carga afetos a cada uma das instalações em análise permite adquirir informação pertinente acerca de aspetos relacionados com o funcionamento das instalações. Algumas particularidades, tais como o regime de operação, a potência máxima absorvida e a distribuição dos consumos ao longo do dia são aspetos interessantes quando se pretende caracterizar as instalações do ponto de vista das respetivas condições de uso e consumo de energia.

Neste âmbito destaca-se a similaridade existente entre os perfis de carga de algumas das instalações em análise, tais como a “K”, “H”, “G”, “I”, “D” e “E” uma vez que revelam um aumento da potência média absorvida a partir das 8h00, prolongando-se até perto das 17h00. Note-se que apesar das instalações operarem de forma ininterrupta, existe um conjunto de

equipamentos, tais como os associados ao tratamento de lamas, que são acionados apenas com a presença dos operadores da ETAR.

Contrariamente ao que sucede com as instalações acima referidas, os perfis de carga registados para as ETAR “A” e “B” revelam um perfil de carga bastante constante, não existindo uma grande amplitude de potência absorvida ao longo do dia. Este facto está relacionado com o regime de funcionamento destas instalações em concreto, mas também com a existência de baixas potências a si associadas e do intervalo de integração utilizado na recolha dos dados em causa, impossibilitando a visualização das oscilações de potência absorvida.

Para as instalações de maiores dimensões (ETAR “L” e “M”), os perfis de carga revelam-se bastante distinto das restantes ETAR. Na ETAR “L”, a potência média absorvida mais elevada localiza-se perto da 3:45h, coincidindo com as horas de super-vazio, onde a tarifa da energia é mais reduzida. Destaca-se ainda a forte variação de potência absorvida pela instalação, ao longo do dia, oscilando entre os 386 kW e os 293 kW.

Para a ETAR “M”, a amplitude de potência elétricas absorvidas varia entre os 300 e os 380 kW, localizando-se o maior valor de potência absorvida às 1h00. Note-se que apesar das diferenças existentes entre os perfis de cargas destas duas instalações, ambas possuem valores de potência absorvida mínima entre as 9h30 e as 12h00, evitando assim o período tarifário correspondente às horas de ponta.

6.4.3 Desagregação dos Consumos

Tal como referido e evidenciado nos capítulos anteriores, as instalações em estudo são bastante variáveis relativamente aos volumes tratados, às cargas poluentes mas também ao conjunto dos processos e tecnologias utilizados no tratamento de águas residuais.

A análise subsequente teve em vista calcular as estimativas da desagregação dos consumos de energia por processo para a totalidade das instalações. Este exercício possibilita a identificação do peso de cada processo no conjunto da instalação, mas também as áreas de intervenção prioritárias, servindo de base para o desenvolvimento de análises comparativas.

A diferença de processos e tipos de equipamentos/tecnologias utilizados nos processos de tratamento de águas residuais, dificulta a definição de uma base comum que permita, em simultâneo, uma desagregação aprofundada e lógica. De forma a resolver esta problemática, foram definidas associações de pequenas etapas para que fossem formados processos mais abrangentes com vista à obtenção de uma “grelha” final que proporcionasse uma visão geral das parcelas de consumos associados a cada processo. O resultado deste exercício pode ser visualizado na tabela seguinte.

Tabela 6.6 - Processos e subprocessos considerados para efeitos de análise (desagregação de consumos)

Processo	Sub-Processo	ETAR												
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Tratamento Preliminar + Tratamento Primário	Elevação Inicial													
	Tamisação ou gradagem													
	Desarenamento e Desengorduramento													
	Tanque de Equalização													
	Sedipac 3D													
	Decantação Primária													
Tratamento Secundário	Decantação Secundária													
	BIOFOR®													
	Arejamento													
	Outros (p.ex. Selector, air lift)													
Tratamento Terciário	U.V													
	Adição de Reagentes													
	Microtamisação e Filtragem													
Tratamento de Lamas	Espessamento													
	Desidratação													
	Estabilização e Ensilagem													
	Recirculação de Lamas, Nitratos e escurências													
Desodorização														
Água de Serviço	Central Hidroressora													
	Elevação Final													
Digestão Anaeróbia														
Edifício de Exploração	Edifício e iluminação exterior													

O exercício de desagregação envolveu a análise conjunta dos dois primeiros processos existentes em estações de tratamento de águas residuais, sendo eles o tratamento preliminar e o tratamento primário. Este tipo de abordagem resulta do facto de existirem, no conjunto de instalações analisadas, órgãos de tratamento que utilizam tecnologias de tratamento compactas, que permitem proceder a subprocessos afetos ao tratamento preliminar juntamente com processos integrados no tratamento primário.

Durante o trabalho de campo e caso de estudo a que se refere o capítulo 5, realizaram-se um conjunto de análises tendo em vista a determinação dos consumos de energia elétrica associada a equipamentos e sistemas grandes consumidores. As estimativas e cálculos concretizados foram efetuados tendo por base um conjunto de dados fornecidos pelos responsáveis pelas instalações e por medições e levantamentos efetuados no local.

Os dados apurados (assumiram-se os resultados obtidos através das medições realizadas durante o trabalho de campo como representativos de regimes médios de funcionamento dos equipamentos) e a análise à informação fornecida (mapas de horas de funcionamento ou regimes de funcionamento relativos a grande parte dos consumidores de energia presentes nas instalações e referentes ao período de referência utilizado para cada instalação), permitiram calcular as estimativas da desagregação de consumos de energia elétrica, por instalação. As parcelas respeitantes a “Erro de fecho e outros consumos” foram calculadas tendo em consideração o consumo global de energia obtido para o período de referência utilizado em cada instalação.

Devido ao facto de parte dos períodos de referência utilizados para a desagregação de cada instalação não corresponder inteiramente ao ano de 2013, leva a que os valores globais de consumo de energia elétrica situem-se em valores ligeiramente distintos dos apresentados na Figura 6.6.

Nas figuras seguintes apresentam-se as desagregações dos consumos de energia elétrica por etapa processual (kWh/ano e %) efetuadas por instalação e por tipologia (ETAR de pequena, média e grande dimensão) definida de acordo com o exposto na Tabela 6.6 e com base na informação presente no Anexo IX.

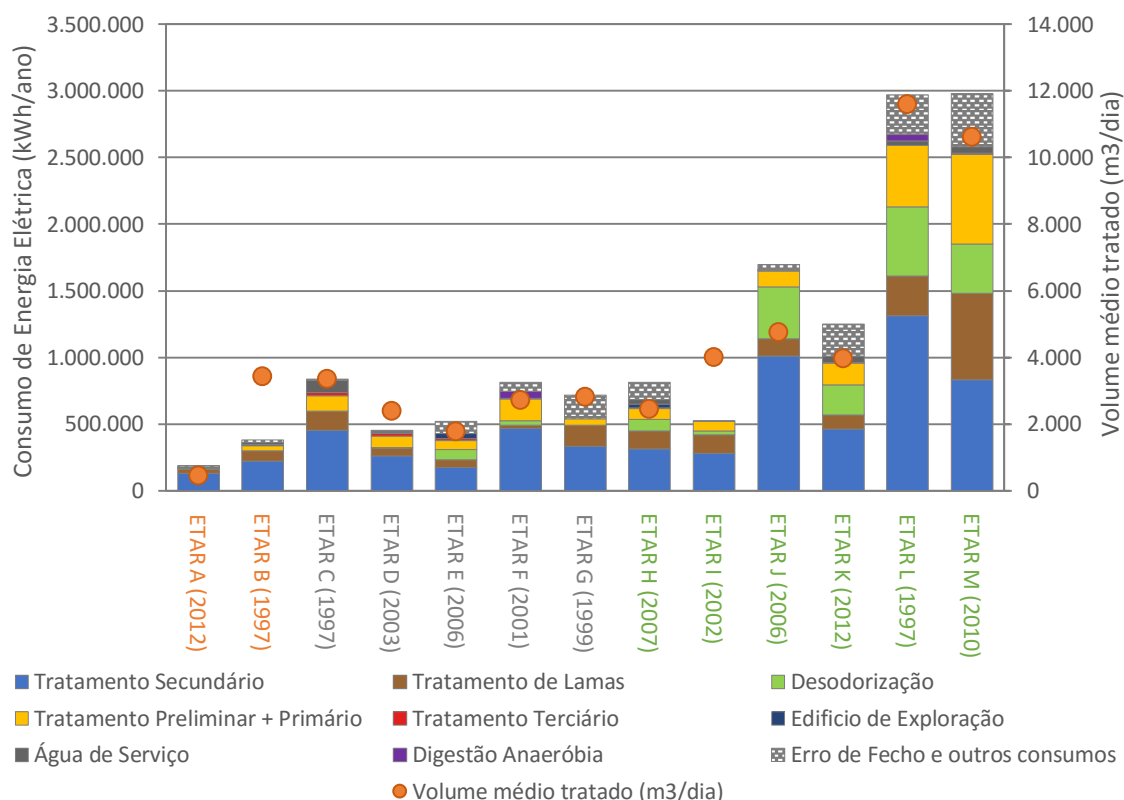


Figura 6.9 - Desagregação dos consumos elétricos por etapa processual (kWh/ano)

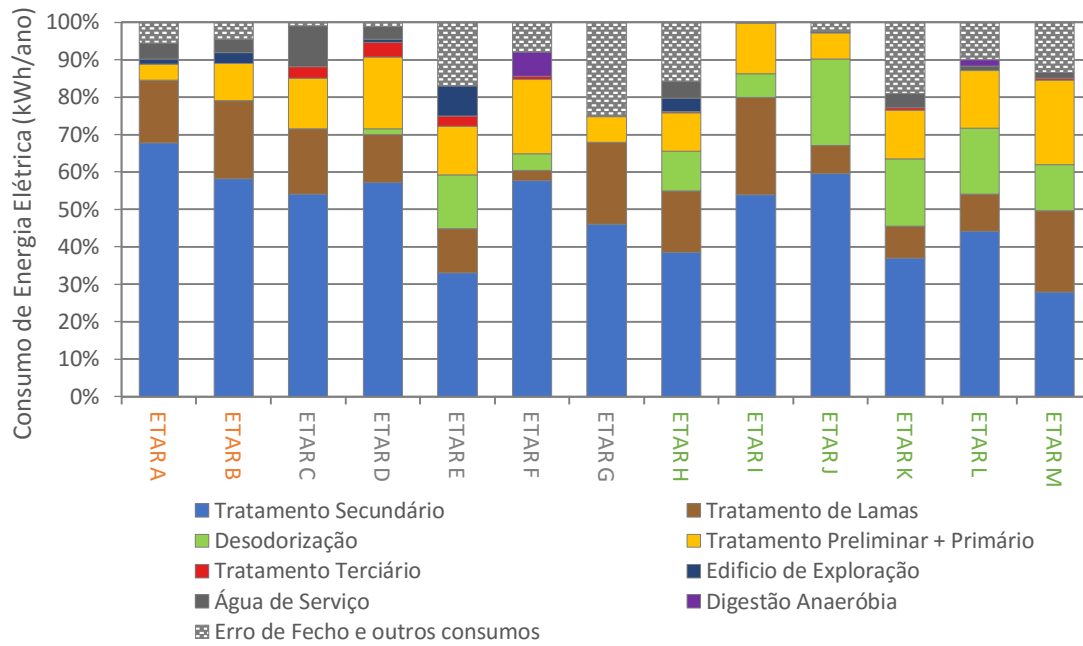


Figura 6.10 - Desagregação dos consumos elétricos por etapa processual (%)

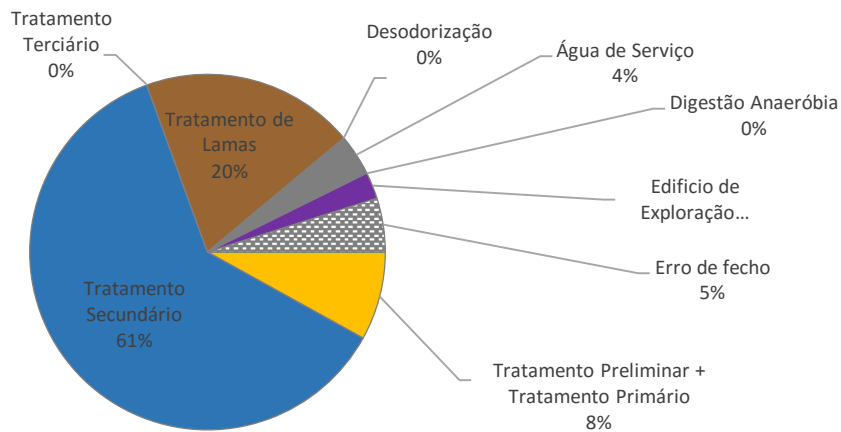


Figura 6.11 - Desagregação conjunta ETAR de Pequena Dimensão

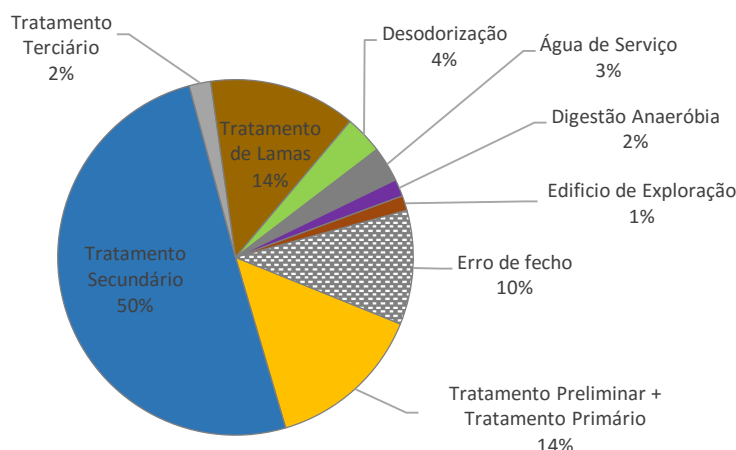


Figura 6.12 - Desagregação conjunta ETAR de Média Dimensão

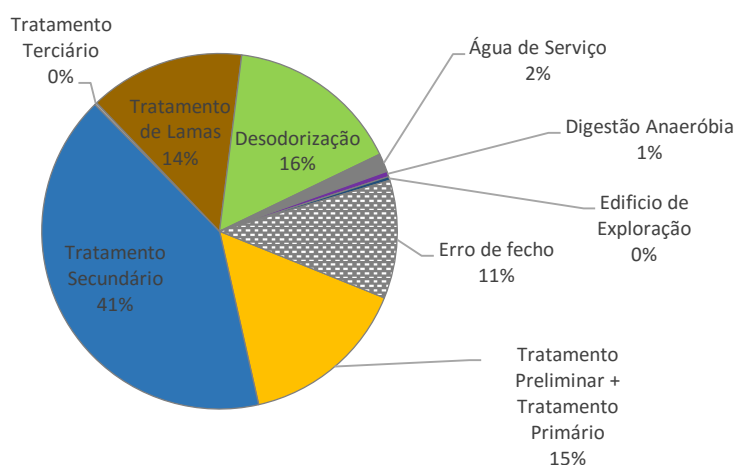


Figura 6.13 - Desagregação conjunta ETAR de Grande Dimensão

A análise às figuras anteriores permite destacar algumas particularidades relacionadas com o peso relativo de cada processo nas diferentes tipologias analisadas. Numa primeira fase importa destacar que a parcela correspondente ao “Erro de fecho” aumenta à medida que a dimensão das ETAR aumenta. Este aspeto está relacionado com o facto da duração do trabalho de campo estar limitada e, por conseguinte, existir um maior número de equipamento que não foram sujeitos ao levantamento dos seus consumos.

Na parcela afeta ao “tratamento preliminar e tratamento primário” verifica-se um aumento do seu peso relativo, tendo-se verificado um peso relativo de cerca de 8% nas ETAR de pequena dimensão, 14% para as de média dimensão e cerca de 15% nas ETAR de grandes dimensão.

O peso relativo do tratamento secundário revela-se o mais elevado, de forma transversal a todas as dimensões analisadas, representando cerca de 61% para ETAR de pequena dimensão, 50% para as de média e 41% para ETAR de grande dimensão. Tendencialmente, a parcela de consumos associada a este processo diminui com o aumento da dimensão da ETAR. Este facto poderá estar relacionado com o aumento dos mecanismos de automação e sondas nele existentes, contribuindo para uma utilização mais racional dos consumos de energia e, conseqüente redução do seu peso relativo na globalidade dos consumos das instalações. O peso relativo deste processo no conjunto

das instalações em análise encontra-se numa ordem de grandeza semelhante aos valores observados por Bolles (45-60% dos consumos).

Quanto ao tratamento de lamas, este representa uma parcela considerável na globalidade dos consumos das ETAR. Contrariamente aos processos anteriormente referidos, o peso relativo deste processo diminui com a dimensão da instalação, tendo representado cerca de 20% dos consumos de energia para as ETAR de pequena dimensão e cerca de 14% para as ETAR de média e grande dimensão. Note-se que, tal como apresentado na Figura 6.5, a quantidade de lamas desidratadas existentes na “ETAR B” é superior às quantidades de lamas existentes em 4 das 5 instalações de média dimensão. Este aspeto leva a que, tal como representado na Figura 6.10, o peso relativo deste processo seja consideravelmente superior ao apresentado no conjunto de instalações de média e grande dimensão. Note-se que as percentagens de consumos associadas ao tratamento de lamas no conjunto das instalações em análises é reiterado pelas observações efetuadas por Xie & Chenwen (2012) e por Hamilton & Arzbaeher (2009).

Os consumos relacionados com o processo de desodorização, frequentemente utilizado em ETAR que tratam elevadas cargas poluentes e localizadas na proximidade de habitações, podem atingir valores bastante elevados e contribuir com percentagens significativas da globalidade dos consumos das instalações, tal como evidenciado na Figura 6.10. Note-se que das instalações em análise, 61,5% possuem processos de desodorização, sendo que 25% estão presentes em ETAR de média dimensão e os restantes 75% dizem respeito às de grandes dimensões.

Tendo em conta o conjunto de instalações analisadas, este processo poderá representar percentagens de consumos variáveis entre os 4,7% (ETAR “F”) e os 23% (ETAR “J”). Destaca-se ainda a distribuição percentual que este processo representa para as tipologias definidas, uma vez que representa 4% da globalidade dos consumos das ETAR de média dimensão e 16% nas instalações de grande dimensão, tal como evidenciado através das Figuras 6.12 e 6.13.

Os processos iniciais de tratamento das águas residuais correspondentes à parcela “Tratamento Preliminar + Tratamento Primário” acarretam, para a amostra em análise, percentagens de consumo variáveis entre os 4,2% e os 22,6%. Estes tratamentos possuem uma grande diversidade de órgãos que variam em função de características próprias de cada instalação, tais como, a cota a que a ETAR foi contruída, que pressupõe a existência de bombas de elevação inicial ou a necessidade de regularização de caudais que afluem de uma forma variável (equalização).

Nas figuras seguintes apresenta-se a desagregação dos consumos de eletricidade por subprocesso correspondente à parcela “Tratamento Preliminar + Tratamento Primário”.

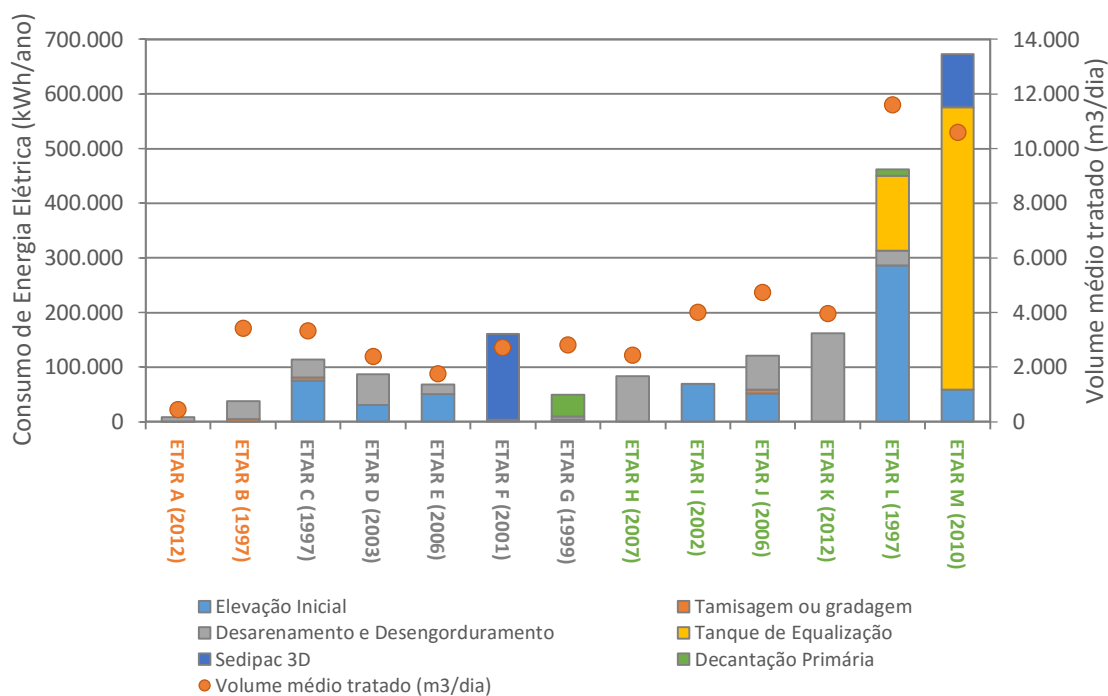


Figura 6.14 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento preliminar + Tratamento Primário" (kWh/ano)

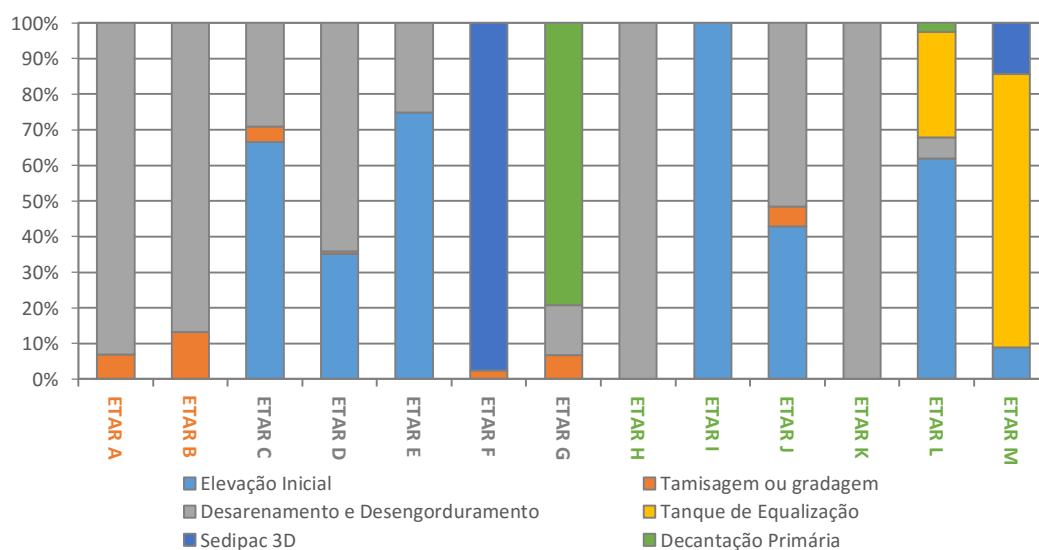


Figura 6.15 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento preliminar + Tratamento Primário" (%)

Da análise às figuras anteriores destaca-se o facto de nas ETAR de pequenas dimensões apenas existirem processos relacionados com a remoção dos gradados, areia e gorduras. Note-se que nestes casos, a parcela referente à remoção de gradados nunca ultrapassa os 15% dos consumos afetos ao à parcela "Tratamento preliminar + Tratamento Primário". É importante destacar uma particularidade comum às ETAR "F" e "M", que está relacionada com a utilização de um sistema compacto (SEDIPAC 3D) para efetuar este par de processos. Apesar deste sistema ser semelhante para as duas instalações, a percentagem que cada um tem na globalidade dos consumos afetos aos processos de tratamento revela-se bastante distinta, representando cerca de 98% para a ETAR "F" e 14% para a "M". Esta diferença resulta da existência de um processo de equalização, na ETAR "M", que se revela o maior consumidor (76,8%) deste conjunto de processo. A existência do

processo de equalização resulta da necessidade de regularizar os caudais que afluem de forma variável, de forma a minimizar os picos de caudais que afetariam o funcionamento dos processos de tratamento.

A elevação inicial, apesar de não ter contribuições relevantes para o tratamento de águas residuais, e a sua existência dever-se exclusivamente à cota a que a ETAR está instalada, revela-se um subprocesso bastante intensivo, do ponto de vista energético, dadas as necessidades de encaminhamento do volume de águas residuais afluente à ETAR com vista a iniciar o processo de tratamento.

Apesar de cada instalação possuir características distintas do ponto de vista processual e das características dos equipamentos nelas existentes, torna-se evidente o facto dos maiores consumos estarem associados ao tratamento secundário. Em termos médios, e analisando as instalações afetas a cada uma das tipologias, é evidente a redução da contribuição dos consumos do tratamento secundário para a globalidade dos consumos à medida que a dimensão das ETAR aumenta. A contribuição do tratamento secundário para a globalidade dos consumos das ETAR varia entre os 61%, para instalações de pequena dimensão, 51% para as de média e 42% para as instalações de grandes dimensões tal como evidenciado nas figuras 6.12 a 6.14.

Nas Figuras 6.16 e 6.17 está representada a contribuição de cada subprocesso para os consumos totais do tratamento secundário.

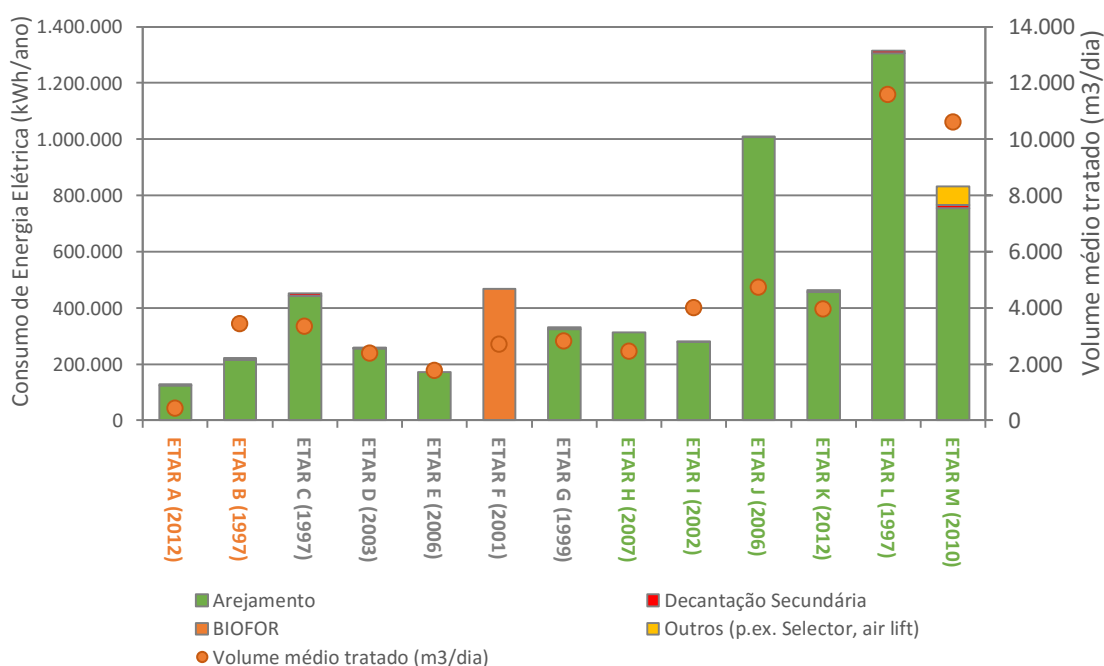


Figura 6.16 - Desagregação do tratamento secundário por subprocesso (kWh/ano)

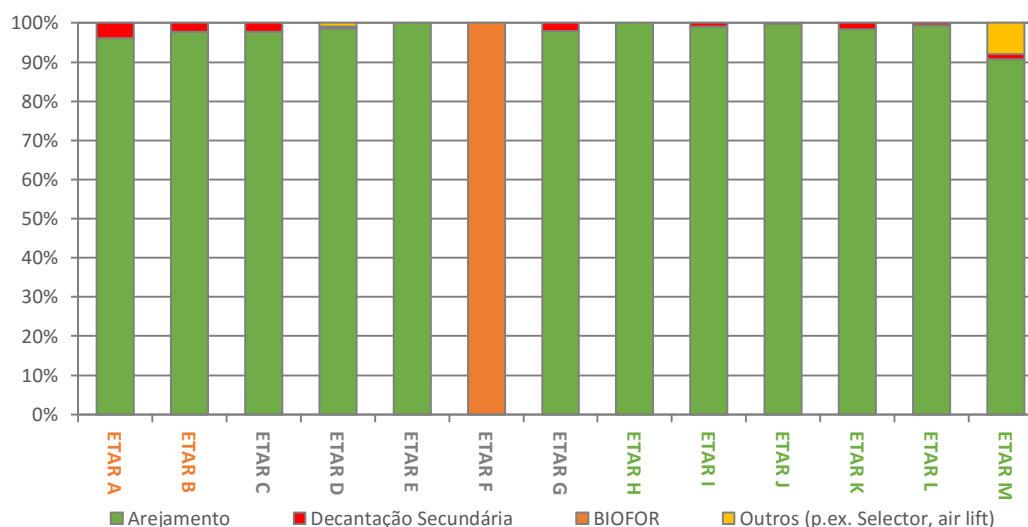


Figura 6.17 - Desagregação dos consumos associados à parcela "Tratamento secundário" (%)

Da análise à figura anterior verifica-se que a maior parcela de consumos associada ao tratamento secundário deve-se ao subprocesso de arejamento. Este aspeto deve-se ao facto de existir, no tanque biológico, grandes necessidades de oxigénio de forma a criar um ambiente estável à comunidade bacteriana. Para tal, são utilizados sobrepresores ou arejadores mecânicos verticais de elevadas potências e com elevados períodos de funcionamento, tal como abordado no capítulo 4. Nas figuras 4.5 e 4.6, apresentam-se diagramas de carga referentes a estes dois tipos de equipamentos, bem como o perfil de carga das instalações em causa no mesmo período, permitindo observar a elevada contribuição dos equipamentos em causa para os consumos globais das instalações.

A existência de um órgão de tratamento compacto na ETAR "F" que permite o desenvolvimento de todo o tratamento secundário no seu interior, levando a que não seja possível aferir separadamente o peso de cada subprocesso associado a este processo.

Realça-se o facto do controlo da operação dos equipamentos responsáveis pelo arejamento influenciar, de forma bastante significativa, os consumos associados a este processo. Da análise à figura 6.16 é visível uma diferença bastante significativa dos consumos associados ao subprocesso de arejamento para as instalações "M" e "L". Este facto deve-se, em parte, ao tipo de tecnologia utilizada por cada uma das ETAR no decorrer desta etapa de tratamento (Arejamento por ar difuso na ETAR "M" e arejadores verticais na ETAR "L"), mas também ao facto de na ETAR "L", o controlo do processo ser efetuado por tabela de tempo, contrariamente ao que sucede em "M" (opera em função do potencial *redox*). Estas instalações, apesar de terem consumos de energia muito próximos, revelam diferenças significativas (perto de 551MWh/ano) nos consumos do processo de arejamento, tal como observado na Figura 6.16.

Uma outra razão para esta discrepância de consumos relacionados com o arejamento do tanque biológico poderá ser o facto de, na ETAR "L", existir um forte contributo industrial o que leva a que a carga poluente afluente à instalação seja, na maior parte das vezes, consideravelmente mais elevada quando comparada com a ETAR "M", tal como evidenciado na Figura 6.3. Este aspeto pode levar a que as necessidades de oxigénio, previamente definidas pelos responsáveis da instalação, sejam bastante mais elevadas, exigindo assim um aumento do tempo de funcionamento dos equipamentos responsáveis por esta função.

A última etapa do tratamento da linha líquida, tratamento terciário, tem uma contribuição pouco significativa para os consumos da generalidade das instalações em análise. Note-se que apesar

85% das instalações que compõem a amostra, possuem o tratamento por lâmpadas UV (desinfecção efluente final e reutilizado na instalação) este encontra-se, muitas vezes, desativado, em da utilização de desinfetantes químicos. Aos equipamentos relacionados com o doseamento de desinfetantes (p.e. bombas doseadoras) não foi dada tanta importância no decorrer das medições efetuadas durante o trabalho de campo, uma vez que possuem baixas potências e reduzidos períodos de funcionamento. De uma forma geral, os consumos afetos a estes equipamentos estão presentes na parcela “erro de fecho e outros consumos”.

Como referido anteriormente, um dos processos com maior contributo para os elevados consumos energéticos de uma ETAR, é o processo de tratamento de lamas. Nas figuras seguintes apresentam-se, para o conjunto das instalações em análise, a desagregação de consumos de cada subprocesso pertencentes a esta etapa de tratamento.

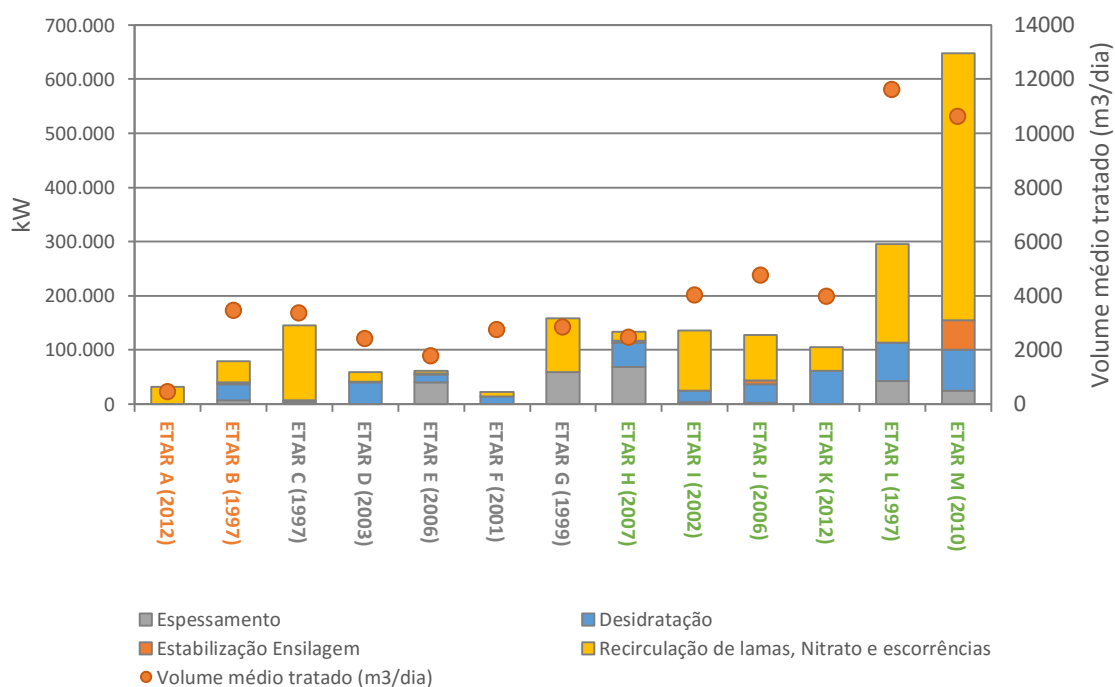


Figura 6.18 - Desagregação do Tratamento de Lamas, por subprocesso (kWh/ano)

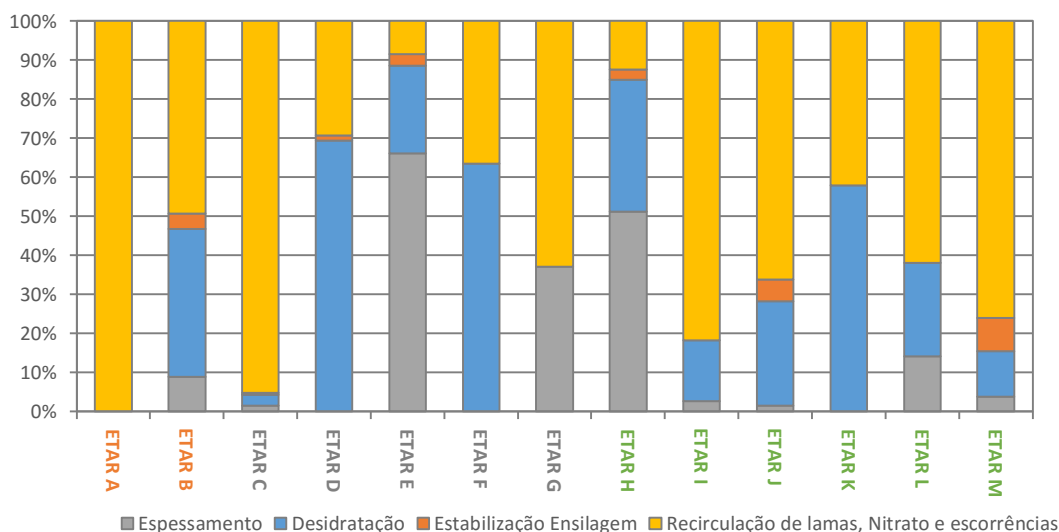


Figura 6.19 - Desagregação do Tratamento de Lamas, por subprocesso (%)

Da análise à figura anterior realça-se que na ETAR “A”, e em resultado das medições efetuadas durante o trabalho de campo, é apenas possível quantificar os consumos referentes à recirculação de lamas, nitratos e escorrências. Este aspeto está relacionado com o processo implementado na instalação uma vez que não possui mecanismos de desidratação em permanência, tal como referido anteriormente, e pela não utilização de etapas processuais relacionadas com a estabilização e ensilagem de lamas produzidas. Quanto ao espessamento de lamas, não foram contabilizados nenhuns consumos associados a este processo uma vez que funciona de forma gravítica, não tendo nenhum consumo energético associado

A figura anterior evidencia o facto dos consumos totais afetos ao tratamento de lamas na ETAR “B”, definida como uma ETAR de pequena dimensão, serem consideravelmente superiores aos registados em três (ETAR “D”, ETAR “E” e ETAR “F”) das cinco instalações definidas como ETAR de média dimensão. A esta circunstancia está associado o facto da quantidade de lama tratada anualmente pela ETAR “B” ser consideravelmente superior às três ETAR acima referidas.

.As dificuldades encontradas na desagregação de consumos referentes à ETAR “G” levaram a que os consumos energéticos de parte do tratamento de lamas, nomeadamente a desidratação, fosse contabilizado na parcela “erro de fecho e outros consumos”. Note-se que a localização da ETAR e a grande variabilidade da população servida ao longo do ano, em virtude da sazonalidade da região em que se encontra, leva a que o processo de desidratação de lamas, habitualmente feito com recurso a um filtro de banda, seja feito através de uma bomba centrífuga com maior capacidade de tratamento e com uma potência elétrica mais elevada.

Tendo por base a Figura 6.19, importa referir a similaridade de distribuição dos consumos de energia no tratamento de lamas referente às ETAR “E” e “H”. A existência de um processo de tratamento de lamas idêntico nas duas instalações, assim como os mecanismos de controle a si associados (p.e. operação em função de sondas) permite fazer uma comparação mais aprofundada entre estas duas ETAR. As diferenças registadas para o subprocesso de desidratação têm que ver com a quantidade de lama desidratada, uma vez que as ETAR registaram, no período em análise, uma diferença de 1.330 t/ano.

Da comparação entre as ETAR “E” e “H” e contrariamente ao que sucede no processo de desidratação, a parcela de consumos afetos ao espessamento de lamas é percentualmente maior na ETAR “E”. Associado a esta questão está o facto do seu funcionamento não depender diretamente da quantidade de lamas produzidas, mas sim da existência, ou não, de lamas nos equipamentos afetos a este processo.

6.5 Indicadores de Desempenho

Uma vez caracterizados os consumos das instalações em análise e tendo em vista a avaliação do desempenho energético de cada uma delas, procedeu-se ao cálculo e análise de indicadores energéticos, eventualmente, representativos do mesmo.

A existência de um regulamento como o SGCIE, direcionado para instalações de carácter industrial, baseado no cálculo dos indicadores apresentados no capítulo 4, leva a que estes sejam, muitas vezes, calculados para as ETAR. Note-se, no entanto, que o facto das empresas gestoras deste tipo de instalações não estarem enquadradas na categoria de pequenas e médias empresas leva a que as ETAR estejam sujeitas à realização de auditorias energéticas, no âmbito do Decreto-Lei 68A. Realça-se que a metodologia considerada no âmbito do Decreto-lei em causa é igual à utilizada no âmbito do SGCIE, levando a que os indicadores energéticos considerados sejam os mesmos.

De forma a possibilitar o cálculo dos indicadores estabelecidos no âmbito do SGCIE, torna-se necessário definir as variáveis produtivas decorrentes deste tipo de instalações. Assim sendo, foram consideradas como “produção” três variáveis distintas: volume de água tratado, carga poluente (dividida entre CBO, CQO e SST) e lamas produzidas por cada uma das instalações presentes na amostra.

No mesmo sentido, e tendo em conta a sua aplicação às diversas instalações que compõem o caso de estudo, serão apresentados e analisados os resultados obtidos durante a análise funcional que teve como objetivo o cálculo do indicador “Valor Sustentável”.

Face ao exposto, nos pontos subsequentes, serão calculados e analisados os respetivos indicadores energéticos.

6.5.1 Consumo Específico de Energia

Na tabela 6.7 são apresentados os dados relativos ao consumo específico de energia (incluindo a produção de energia elétrica para autoconsumo) calculado com base nos produtos decorrentes do processo de tratamento das águas residuais (volume tratado, lamas produzidas e cargas poluentes removidas). Note-se que a presente análise teve por base os dados anuais de cada uma das instalações relativos a 2013.

Tabela 6.7 - Consumo específico de energia

	Consumo Específico				
	kWh/m ³	kWh/ kg lamas	kWh/ kg CBO	kWh/ kg CQO	kWh/ kg SST
ETAR A	1,26	n.d.	11,82	5,30	12,21
ETAR B	0,55	0,20	2,25	1,04	2,37
ETAR C	0,61	0,67	3,84	1,73	3,57
ETAR D	0,52	0,35	3,28	1,01	3,33
ETAR E	0,99	0,91	6,13	1,46	2,57
ETAR F	0,81	1,87	1,06	2,44	1,88
ETAR G	0,70	0,37	4,16	1,85	4,29
ETAR H	1,04	0,46	3,85	1,25	4,70
ETAR I	0,32	0,16	1,53	0,79	1,32
ETAR J	0,92	0,59	1,30	0,75	2,25
ETAR K	0,87	0,80	2,37	1,06	2,03
ETAR L	0,77	0,87	1,00	0,53	1,65
ETAR M	0,56	0,60	1,68	0,83	1,69

Da análise à tabela anterior destaca-se a grande variabilidade da ordem de grandeza que os consumos específicos de energia, nas suas várias formas, têm entre instalações. Uma análise mais pormenorizada, tendo por base a evolução do consumo específico mensal por volume de água tratada permite verificar uma grande flutuação deste valor ao longo do ano, conforme apresentado na Figura 6.20.

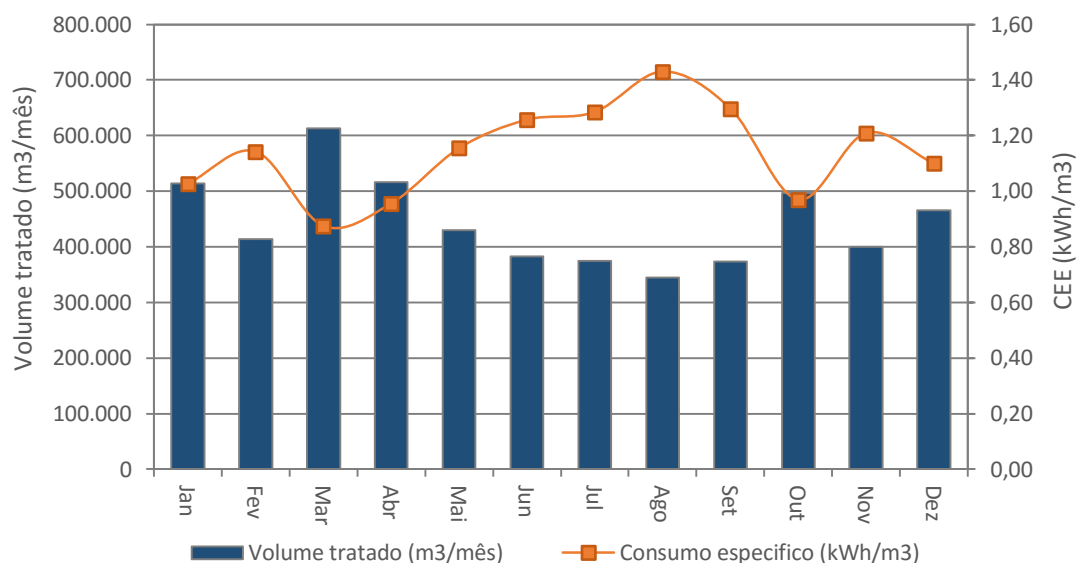


Figura 6.20 –Consumos específicos mensais de energia elétrica por volume afluente

Estas flutuações podem resultar de diversos fatores, consoante as características da infraestrutura em análise, tais como o consumo de energia independente do processo produtivo, que varia em função de aspetos relacionados com o dimensionamento dos órgãos existentes nas instalações, mas também do facto do regime de funcionamento das mesmas manter-se inalterável durante o ano, repercutindo-se, no consumo específico, em situações em que o volume afluente, ou as restantes variáveis, são consideravelmente mais baixas. Este aspeto é evidente para a ETAR “A”, onde as concentrações médias anuais dos parâmetros analíticos são as mais baixas da amostra em análise e, por conseguinte os consumos específicos referentes a cada variável produtiva (com exceção da quantidade de lamas produzidas, uma vez que não são quantificadas) tomam valores superiores a todos os restantes.

Uma outra questão pertinente quando se abordam os consumos específicos de energia deste tipo de instalações está relacionado com o facto de, por vezes, as instalações estarem a tratar volumes de água consideravelmente abaixo daqueles para o qual foram projetadas. Esta particularidade pode levar a que os equipamentos existentes nas diversas etapas de tratamento operem abaixo do seu nível de funcionamento ótimo, podendo provocar alterações nos valores do consumo específico das instalações. Na Figura seguinte apresenta-se a relação entre o consumo específico de energia por volume de água tratada e a relação existente entre o volume médio de água tratado e o projetado de cada uma das instalações.

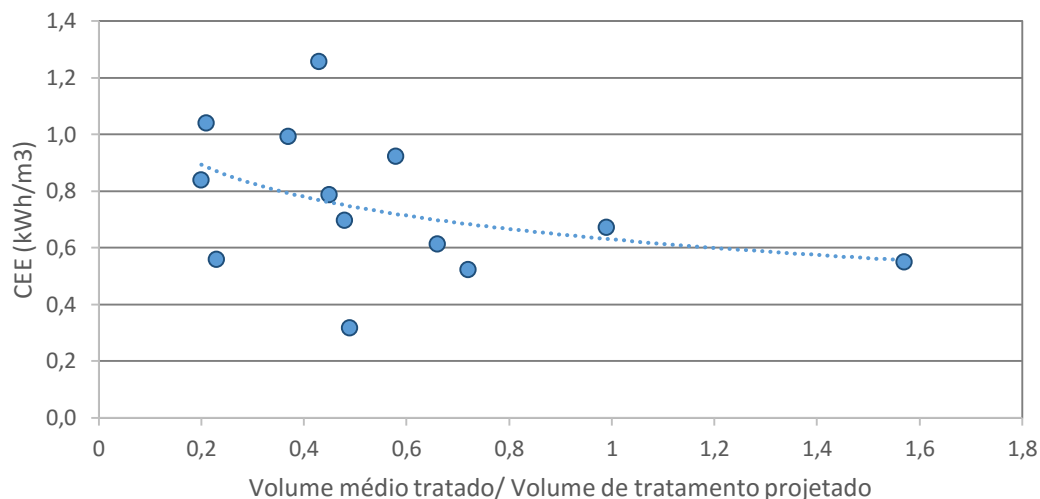


Figura 6.21 – Relação entre consumo específico de energia (kWh/m³) e a razão entre o volume tratado e o projetado

A análise à figura anterior não permite verificar que o facto das ETAR estarem a operar a um regime consideravelmente abaixo daquele para o qual foram projetadas tem consequências diretas para o consumo específico de energia. Tendo em conta o exposto, a não verificação de uma relação de dependência entre o indicador em análise e a razão entre os volumes efetivos e projetados não descarta a hipótese da instalação estar a ser menos eficiente, mas sim a existência de outras variáveis com influencia nos consumos energéticos deste tipo de instalações.

Uma vez calculados os consumos específicos para cada uma das variáveis produtivas, e tendo em vista a verificação, ou não, da existência de uma relação causal entre estas variáveis e os consumos de energia, apresentam-se, na tabela seguinte, os valores do coeficiente de determinação para cada uma das situações em análise.

Tabela 6.8 - Coeficiente de Determinação (R²)

	Coeficiente de Determinação (R ²)				
	kWh/m ³	kWh/ kg lamas	kWh/ kg CBO	kWh/ kg CQO	kWh/ kg SST
ETAR A	0,09	n.d*	0,11	0,02	0,07
ETAR B	0,11	0,17	0,00	0,00	0,11
ETAR C	0,44	0,15	0,25	0,22	0,03
ETAR D	0,20	0,05	0,19	0,02	0,02
ETAR E	0,36	0,07	0,02	0,02	0,02
ETAR F	0,38	0,10	0,01	0,17	0,32
ETAR G	0,00	0,24	0,38	0,48	0,43
ETAR H	0,40	0,50	0,03	0,17	0,32
ETAR I	0,18	0,30	0,57	0,38	0,13
ETAR J	0,01	0,02	0,37	0,40	0,25
ETAR K	0,51	0,03	0,04	0,06	0,25
ETAR L	0,17	0,00	0,13	0,14	0,06
ETAR M	0,53	0,28	0,13	0,07	0,03

*Não disponível

De uma forma geral, o coeficiente de determinação (R^2), calculado para cada uma das instalações evidencia uma grande dispersão de registos e a inexistência de uma relação causal entre os consumos de energia da instalação e cada uma das variáveis produtivas avaliadas de forma independente, uma vez que a generalidade dos coeficientes de determinação encontram-se substancialmente abaixo do limite habitualmente utilizado, $R^2 \geq 0,75$ (Chatterjee & Hadi, 2012). A título informativo são apresentadas as melhores relações conseguidas entre os consumos de energia e diferentes variáveis produtivas consideradas, tendo por base os dados mensais decorrentes do seu processo produtivo.

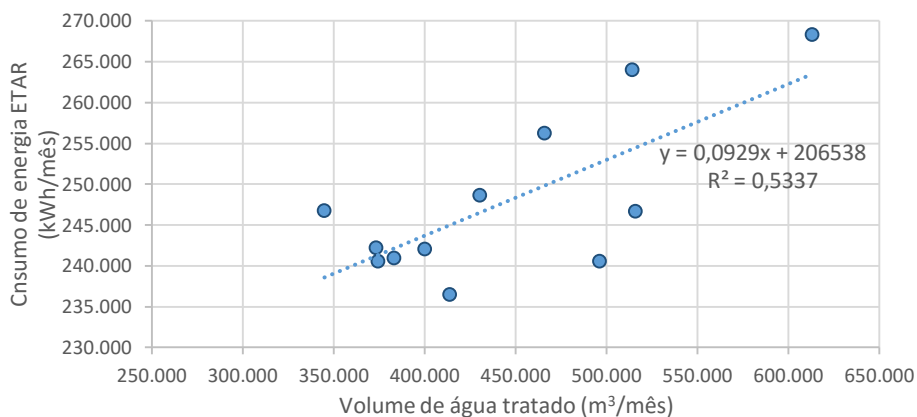


Figura 6.22 - Relação entre consumos de energia e volume de água tratado – ETAR “M”

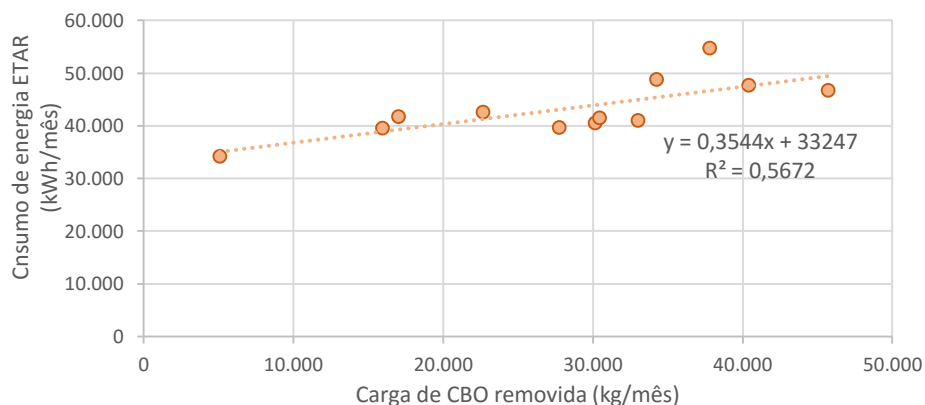


Figura 6.23 - Relação entre consumo de energia e carga de CBO removida – ETAR “I”

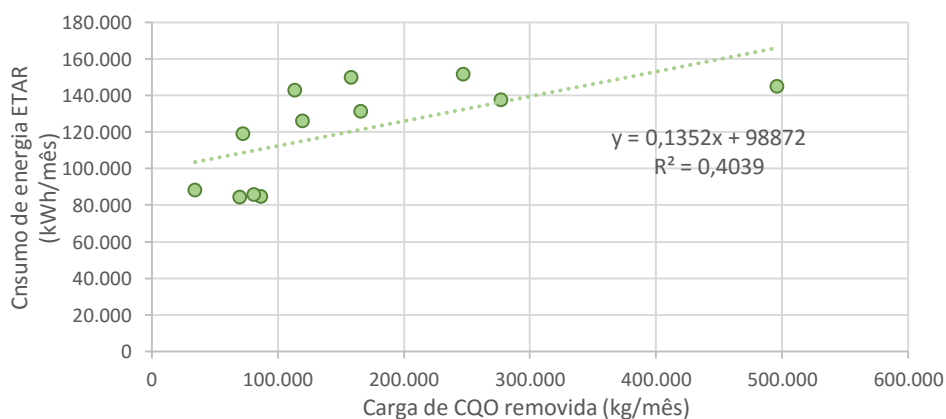


Figura 6.24 - Relação entre consumo de energia e carga de CQO removida – ETAR de “J”

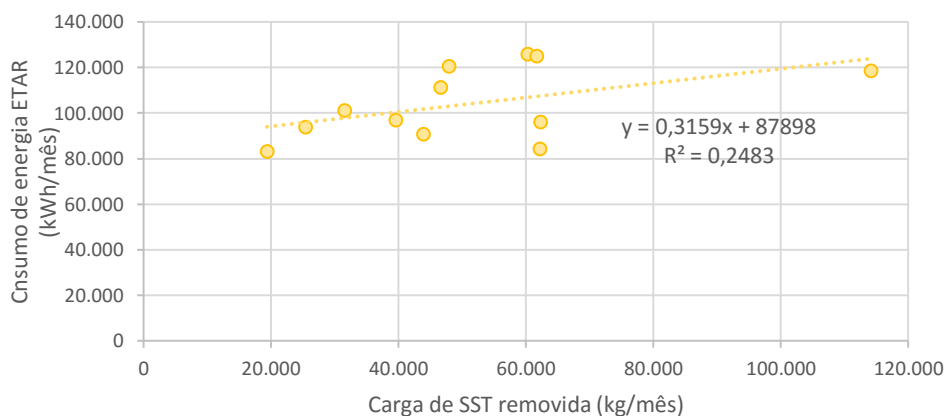


Figura 6.25 - Relação entre consumo de energia e carga de SST removida – ETAR “K”

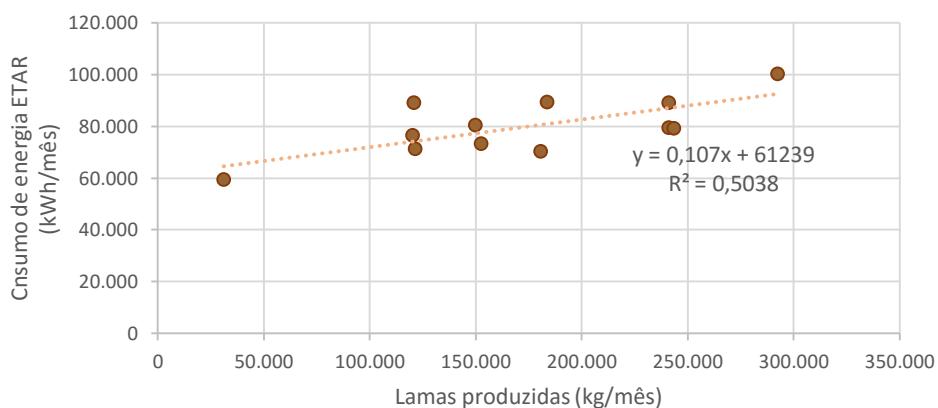


Figura 6.26 - Relação entre consumo de energia e lama produzida – ETAR “H”

Realça-se o facto de na Figura 6.22 (relação consumo de energia vs. volume de água tratada) a instalação em causa ter consumido, sensivelmente, a mesma quantidade de energia para tratar 370.000 m³ de afluente que aquela que consumiu para tratar 496.000 m³. Tendo em conta o exposto é possível afirmar que os consumos de energia não podem ser explicados unicamente pela variação dos volumes de água tratada.

Para os parâmetros representativos da carga poluente afluente, foi efetuada uma análise semelhante à utilizada na comparação entre os consumos de energia e os volume de água tratado. A realização deste exercício permitiu verificar a inexistência de qualquer relação estatisticamente válida entre os parâmetros utilizados na caracterização da carga poluente afluente às ETAR e a variação dos consumos de energia.

Tendo em conta o exposto e tendo em consideração as características processuais deste tipo de instalações, a análise efetuada permite clarificar que na origem do facto de não ser comprovável uma relação de proporcionalidade entre o consumo de energia e o volume de água tratada, assim como a carga poluente, pode estar a influência conjunta de aspetos relacionados com a qualidade e quantidade dos volumes de água afluente à instalação.

6.5.2 Intensidade Energética

A intensidade energética representa outro indicador utilizado nas instalações abrangidas pelo SGCIE, aferido através do quociente entre o consumo total de energia e o valor acrescentado bruto (VAB) das atividades empresariais diretamente ligadas às instalações industriais. Na Tabela 6.9 apresenta-se a intensidade energética de cada uma das instalações analisadas.

Tabela 6.9 - Intensidade energética

Instalação	Intensidade Energética
ETAR A	n.d.
ETAR B	-0,981
ETAR C	0,487
ETAR D	n.d.
ETAR E	n.d.
ETAR F	0,701
ETAR G	-9,14
ETAR H	n.d.
ETAR I	n.d.
ETAR J	0,356
ETAR K	0,964
ETAR L	0,637
ETAR M	0,466

A análise à tabela anterior permite visualizar a existência de valores negativos de intensidade energética. A contribuir para a existência de valores de intensidade energética negativos está o facto do VAB utilizado na aferição deste indicador representar, em alguns casos, valores negativos. Note-se que o VAB das empresas varia em função de alguns parâmetros relacionados com políticas de investimento das empresas, serviços contratados ou outros custos e perdas operacionais, inviabilizando a sua utilização para a aferição de um indicador energético.

6.5.3 Intensidade Carbónica

Tal como referido anteriormente, a intensidade carbónica é aferida através do quociente entre o valor das emissões de gases de efeito de estufa resultantes da utilização das várias formas de energia no processo produtivo, calculadas com base em fatores de emissão tabelados por lei, e o respetivo consumo total de energia.

De acordo com as informações recolhidas junto das entidades responsáveis pelas ETAR analisadas, o seu *mix* energético apenas contempla a utilização de eletricidade. Tendo em conta o exposto, é possível verificar que o valor do indicador em causa será igual para todas as instalações, atingindo um valor de 2,186 tCO_{2e}/tep para o ano de 2013. De seguida é apresentado, a título de exemplo, o cálculo deste indicador para uma dada instalação.

$$\text{Intensidade Carbónica (tCO}_2\text{/tep)} = \frac{\text{Emissões GEE (kg CO}_2\text{)}}{\text{Consumo Total de Energia (tep)}} \quad (12)$$

Tendo em conta os fatores de emissão (0,47 kg Co_e/kWh) e de conversão (0,000215 tep/kWh) tabelados, a intensidade carbónica para uma instalação com um consumo de energia de 350 MWh (350.000 kWh) é dada por:

$$\text{Intensidade Carbónica (tCO}_2\text{/tep)} = \frac{350.000 \times 0,47}{350.000 \times 0,000215 \times 1000} = 2,186 \text{ tCO}_2\text{/tep} \quad (13)$$

Assim sendo, e mantendo-se esta situação nos anos subsequentes a ordem de grandeza do indicador em causa manter-se-á, não representando, tal como referido no Capítulo 4.3.3, um indicador válido na avaliação do desempenho energético da instalação.

6.5.4 Valor Sustentável

Na Tabela 6.10 apresentam-se os dados relativos ao indicador energético “Valor Sustentável”. O seu cálculo foi efetuado com base na relação entre a satisfação das necessidades e os recursos utilizados, conforme avançado no capítulo 4.3.4. Neste âmbito, foram consideradas como “funções” a remoção de matéria orgânica, sólidos, carga microbiana e odores. Note-se que, em função do tipo e características processuais destas instalações, foram consideradas diferentes valores de “importância relativa”, repercutindo-se na determinação do desempenho e, consequentemente no cálculo do indicador “Valor Sustentável”.

Tabela 6.10 - Indicador “Valor Sustentável”

Instalação	Valor Sustentável
ETAR A	118
ETAR B	297
ETAR C	225
ETAR D	160
ETAR E	255
ETAR F	183
ETAR G	196
ETAR H	111
ETAR I	408
ETAR J	149
ETAR K	155
ETAR L	245
ETAR M	235

Os dados apresentados na tabela anterior mostra-se consideravelmente distintos entre instalações, não se verificando nenhum tipo de tendência entre instalações com dimensões semelhantes ou com processos e características semelhantes.

Este indicador surge como uma avaliação das tarefas (funções) que a ETAR necessita de realizar, ponderando a sua importância, e contabilizando os recursos envolvidos na sua execução. Apesar de revelar-se útil, tendo em conta o propósito a que pretende responder, é importante considerar que, na sua génese, possui parâmetros de ponderação que se baseiam na sensibilidade dos intervenientes no seu processo de cálculo. Tendo em conta o exposto, este tipo de análise poderá levar a que a parcela de “importância relativa” de uma dada “função” seja consideravelmente diferente para duas instalações com características semelhantes, prejudicando exercícios de análise comparativa entre instalações.

6.6 Relação entre Consumos e Produção

Tendo em conta todas as problemáticas associadas à utilização dos indicadores supracitado e tendo em conta a inexistência de relação entre o consumo de energia e qualquer uma das variáveis consideradas para estações de tratamento de águas residuais, torna-se necessário proceder à identificação e avaliação de metodologias que permitam assegurar uma monitorização fiável das condições de consumo de energia. Tendo em conta o exposto foi efetuado, no âmbito do caso de estudo apresentado, análises de regressão multivariáveis que relacionassem os consumos de energia com os dados volumétricos e qualitativos de cada uma das ETAR em estudo.

Os resultados mais favoráveis alcançados para cada uma das ETAR em estudo são apresentados de seguida:

Tabela 6.11 - Resultados dos modelos alcançados

ETAR	R ²	Coefficiente de Variação (RMSE)	Erro Padrão	Variáveis independentes utilizadas	Obs*
ETAR A	0,28	0,042	668	Volume afluente (m ³ /mês); Carga CBO afluente (kg/mês)	12
ETAR B	0,20	0,091	2.793	Volume afluente (m ³ /mês); Lamas produzidas (kg/mês);	12
ETAR C	0,17	0,135	5.093	Volume afluente (m ³ /mês); Carga CQO afluente (kg/mês)	12
ETAR D	0,72	0,077	3.340	Volume afluente (m ³ /mês); Carga CBO afluente (kg/mês); Lamas produzidas (kg/mês);	12
ETAR E	0,19	0,113	6.513	Volume afluente (m ³ /mês); Carga CBO afluente (kg/mês)	12
ETAR F	0,48	0,128	7.752	Volume afluente (m ³ /mês); Carga de SST afluente (kg/mês);	18
ETAR G	0,52	0,061	4.201	Volume afluente (m ³ /mês); Carga de SST afluente (kg/mês);	12
ETAR H	0,50	0,067	4.533	Volume afluente (m ³ /mês); Carga de SST afluente (kg/mês);	12
ETAR I	0,62	0,093	7.445	Volume afluente (m ³ /mês); Lamas produzidas (kg/mês);	12
ETAR J	0,50	0,119	12.556	Volume afluente (m ³ /mês); Lamas produzidas (kg/mês);	12
ETAR K	0,21	0,066	8.305	Volume afluente (m ³ /mês); Carga CQO afluente (kg/mês);	12
ETAR L	0,26	0,04	10.879	Volume afluente (m ³ /mês); Lamas produzidas (kg/mês);	12
ETAR M	0,84	0,078	15.665	Volume afluente (m ³ /mês); Lamas produzidas (kg/mês);	36

*Número de observações registadas

Através da análise aos dados acima apresentados é possível verificar que a grande maioria dos modelos desenvolvidos para cada uma das instalações apresenta resultados pouco satisfatórios, nomeadamente, no coeficiente de determinação, erro padrão e respetivo coeficiente de variação.

A título meramente exemplificativo e de forma a tornar este exercício mais perceptível apresenta-se, de seguida, a análise dos dados utilizados e resultados alcançados nos modelos gerado para duas ETAR com características distintas (ETAR “M” e “L”).

- ETAR “M”

Inicialmente e de forma a conhecer as relações existentes entre cada uma das variáveis independentes e o consumo de energia da instalação recorreu-se, tal como no ponto 6.5.1, a uma análise de regressão entre o consumo de energia e o volume de afluente tratado. Nas figuras 6.27 e 6.28 apresentam-se as relações para o período compreendido entre 2011 e 2013 numa única série

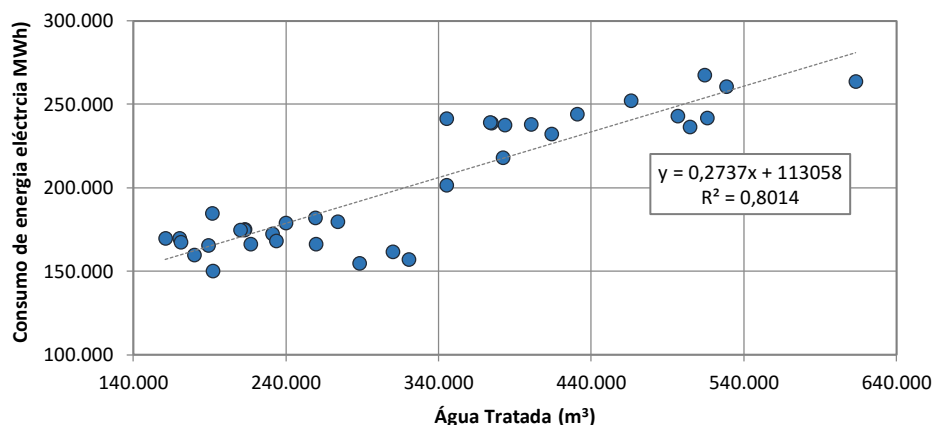


Figura 6.27 - Relação entre consumo de energia e volume tratado - triénio 2011 a 2013

A análise à figura anterior permite evidenciar a existência de uma relação causal entre os consumos de energia da instalação e o volume de água tratada para a série de dados correspondente ao triénio 2011-2013. Este facto é corroborado através da avaliação do coeficiente de determinação que é superior ao limite habitualmente utilizado ($R^2 > 0,75$), indicando que uma fração de 80% dos consumos da instalação pode ser explicada pela variação dos volumes de água afluente.

Contudo, apesar de satisfatória, a série conjunta dos três anos em análise esconde uma informação bastante pertinente que está relacionada com o facto da relação entre estas duas variáveis não ser válida para todas as séries em estudo, tal como observável na figura seguinte.

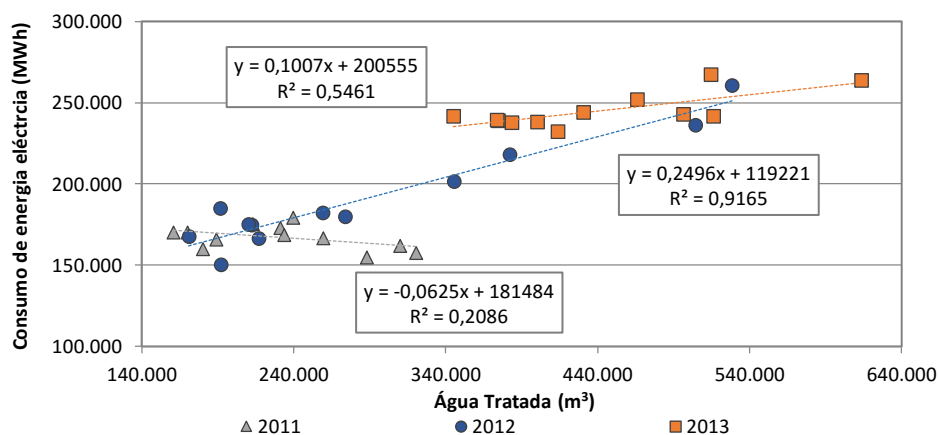


Figura 6.28 - Relação entre consumo de energia e volume tratado - séries isoladas (2011 a 2013)

Os registos em causa evidenciam, no entanto, que apenas em 2012 se obteve uma relação estatisticamente válida entre os consumos de energia da instalação e os volumes de água afluente. Dada a inexistência uma correlação válida entre as variáveis em 2011 e 2013 destacam-se, a título de exemplo, os seguintes factos:

- Em 2011 o consumos marginal de energia por volume tratado ter assumido um valor negativo (-0,06 kWh);

- Em 2013 a instalação ter consumido a mesma quantidade de energia para tratar cerca de 516 mil m³ que aquela que consumiu para tratar quantidades significativamente inferiores (345 mil m³);

Apesar dos desvios existentes para algumas das séries em estudo, o facto de existir uma correlação bastante forte para o ano de 2012 permite “equilibrar” a série conjunta o que não leva a que seja impeditiva a sua utilização para a definição de modelos. Contudo, tendo em consideração as características processuais da instalação pode considerar-se que na origem do facto de não ser comprovável uma relação direta de proporcionalidade entre o volume mensal de afluyente e os consumos mensais de energia, para toda a série de dados em análise, poderá estar a influencia de aspetos qualitativos relativos a esses mesmos volumes (cargas poluentes).

A avaliação de um modelos de regressão multivariável estatisticamente válido tendo por base o volume de água tratada e os vários parâmetros utilizados na caracterização poluente do afluyente (CBO, CQO e SST) não revelou resultados satisfatórios. Este facto poderá estar associado, tal como referido anteriormente, ao facto dos valores registados não serem representativos de um valor médio respeitante ao mês em questão. O facto da ETAR em causa receber uma percentagem considerável de afluentes industriais e a operação do processo de arejamento (maior consumidor) variar em função das características qualitativas do afluyente poderia indicar que parte dos consumos de energia poderiam variar em função das mesmas. (p.e. CQO, uma vez que é utilizado frequentemente para instalações que tenham contribuições industrial)

Dada a inexistência de uma relação entre qualquer uma das variáveis associadas à carga poluente no afluyente e o consumo de energia foi efetuado o mesmo exercício para a quantidade de lamas produzidas pela instalação para o mesmo período (triénio 2011 a 2013). O coeficiente de determinação entre esta variável e o consumo de energia assumiu uma ordem de grandeza próxima dos 0,84 (as séries isoladas relativas a 2011,2012 e 2013 geraram coeficientes inferiores a 0,75), o que levou a que fosse considerada a sua utilização no modelo multivariável.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores de interesse obtidos, com recurso ao software supracitado, para o modelo que apresentou melhores resultados, nomeadamente aquele que relaciona os consumos de energia mensais com a quantidade mensal de afluyente (m³) e a quantidade de lamas produzidas (kg) – dados relativos ao período compreendido entre Janeiro de 2011 e Dezembro de 2013.

Tabela 6.12 - Análise de regressão multivariável – Resultados do modelo (ETAR “M”)

ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO					
Modelo	Coefficiente de determinação	Coefficiente de Variação	Erro Padrão	Erro do modelo matemático (%)	Número de observações
	0,84	0,078	15.665	0,000	36

Tabela 6.13 - Análise de regressão multivariável – Variáveis independentes (ETAR “M”)

Variáveis independentes	Parâmetro	Coefficiente	Erro Padrão	Stat T	95% Inferior	95% Superior
	Ordenada na origem	106.454	7.611	13,99	90.969	121.939
	Afluyente (m3)	0,157	0,04	3,53	0,067	0,248
	Lamas (kg)	0,152	0,05	2,97	0,048	0,256

O modelo de regressão gerado, para o consumo de energia e correspondentes séries de volume de afluyente e quantidade de lamas produzidas corresponde, desta forma, à seguinte função:

$$\begin{aligned} \text{Consumo EE}_{(kWh/m\acute{e}s)} &= 106.454 + (0,157 \times \text{Volume Afluyente}_{(m^3)}) + (0,152 \\ &\times \text{Lamas Produzidas}_{(kg)}) \end{aligned} \quad (14)$$

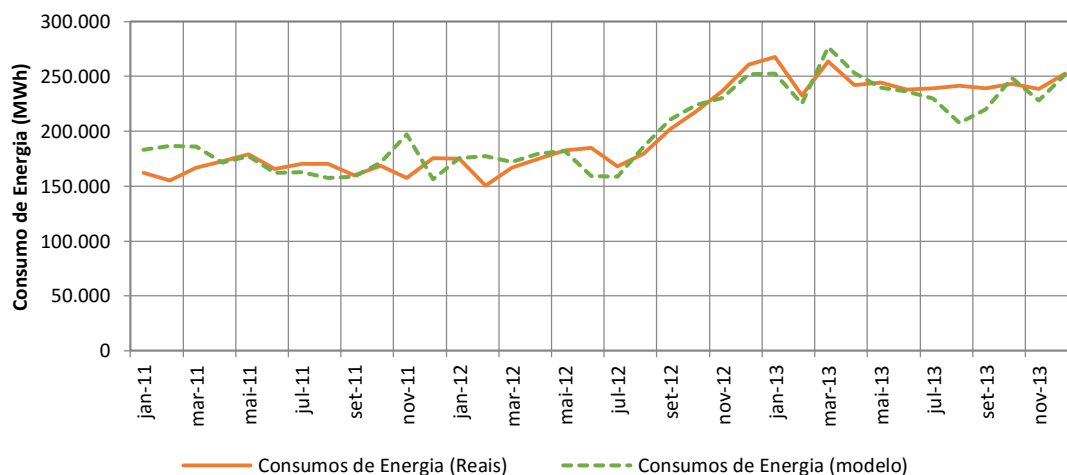


Figura 6.29 - Consumos mensais de energia elétrica (valores reais e gerados pelo modelo)

Da análise à tabela 6.12 é observável um coeficiente de determinação de 0,84, o que se revela bastante satisfatório para um modelo deste tipo. Contudo, os resultados obtidos para o coeficiente de variação, definido como o quociente entre o erro padrão e o consumo de energia médio assumiu um valor de 0,078, o que se revela superior ao valor habitualmente considerado como aceitável (0,05).

Os valores de erro padrão de cada uma das variáveis utilizadas (0,04 para volume afluyente e 0,05 para quantidade de lamas desidratadas) permite aferir um valor de estatística-t que será comparado com os valores críticos existentes na tabela de distribuição t-student. Neste caso, uma vez que os valores da estatística-t alcançados (3,53 e 2,97) são superiores ao valor crítico existente na tabela acima referida (2,05), pode dizer-se que as duas variáveis independentes utilizadas são altamente significativas.

Note-se que a estimativa fornecida pelo modelo gerado, relativamente ao consumo global de energia no período de referência (triénio 2011 a 2013) deverá ser igual ao consumo real de energia nesse período. Para o modelo em causa, em virtude da utilização do método dos mínimos quadrados, o erro associado aos valores produzidos situa-se em valores inferiores a 0,001%, revelando-se abaixo do erro máximo admissível (0,005%) especificado no âmbito da ASHRAE. (ASHRAE, 2002)

- **ETAR “L”**

Para a ETAR “L” foi efetuado um exercício semelhante ao desenvolvido no âmbito da ETAR “M”, contudo, quando comparados, os resultados do modelo desenvolvido apresentam-se menos satisfatórios.

Este exercício permitiu verificar que não foi encontrado qualquer modelo estatisticamente válido que explicasse a evolução dos consumos de energia em função das variáveis relacionadas com a

carga poluente do afluente. A este facto poderá estar associada, tal como avançado anteriormente, a circunstancia de os registos de qualidade do caudal afluente não serem representativos de um valor médio respeitante ao mês em questão. Contudo, tendo em conta as condições de operação da instalação, o regime de funcionamento do processo que representa maiores consumos anuais (arejamento), contrariamente ao sucedido na ETAR “M”, não varia em função da carga afluente, o que poderá minimizar as eventuais variações dos consumos de energia com a carga poluente.

Nas tabelas seguintes apresenta-se o resumo dos resultados gerados para o para o modelo que apresentou melhores resultados, nomeadamente aquele que relaciona os consumos de energia mensais (contabilizando a produção de energia elétrica da instalação) com a quantidade mensal de afluente (m³) e a quantidade de lamas produzidas (kg) – dados relativos ao período compreendido entre Setembro de 2013 e Agosto de 2014.

Tabela 6.14 - Análise de regressão multivariável – Resultados do modelo (ETAR “L”)

ESTATÍSTICAS DE REGRESSAO					
Modelo	Coefficiente de determinação	Coefficiente de Variação	Erro Padrão	Erro do modelo matemático (%)	Número de observações
	0,26	0,04	10.879	0,000	12

Tabela 6.15 - Análise de regressão multivariável – Variáveis independentes (ETAR “L”)

Variáveis independentes	Parâmetro	Coefficiente	Erro Padrão	Stat T	95% Inferior	95% Superior
	Ordenada na origem	200.408	61.291	3,270	61.758	339.059
	Afluente (m3)	0,084	0,115	0,730	-0,175	0,343
	Lamas (kg)	0,117	0,074	1,594	-0,049	0,284

Da análise aos dados das tabelas anteriores destaca-se o facto do coeficiente de variação ter atingido um valor que poderá ser considerado satisfatório, uma vez que se situa abaixo dos 0,05 especificados no âmbito do IPMVP. Por outro lado, o coeficiente de determinação representa um valor muito longe do limite mínimo considerado satisfatório (0,75), tendo registado um valor de 0,26 o que permitirá afirmar que apenas 26% dos consumos reais podem ser representados pelo modelo em causa.

O modelo de regressão gerado corresponderia, desta forma, ao seguinte:

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo } EE_{(kWh/m\acute{e}s)} &= 200.408 + (0,084 \times \text{Volume Afluente}_{(m3)}) + (0,117 \\
 &\times \text{Lamas Produzidas}_{(kg)}) \quad (15)
 \end{aligned}$$

Na Figura 6.30 apresentam-se, para efeitos comparativos, os resultados relativos aos consumos de energia do período de referência e os consumos de energia gerados pelo modelo criado. A estimativa fornecida pelo modelo

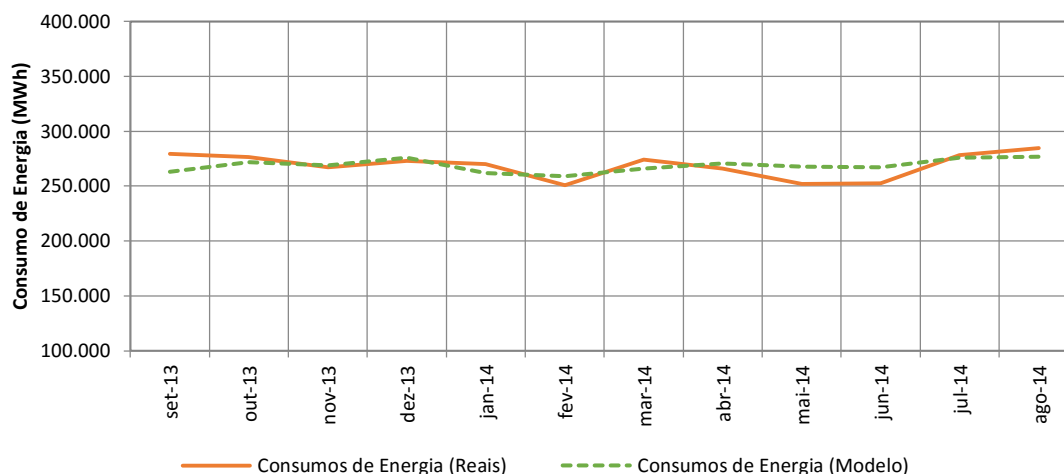


Figura 6.30 - Consumos mensais de energia elétrica (valores reais e gerados pelo modelo)

A análise à figura anterior permite destacar a pouca variação dos consumos de energia ao longo do ano em análise. Este facto poderá ser justificado pelo facto da ETAR em análise estar a operar no máximo das suas capacidades (serve cerca de 153.000 habitantes equivalentes atuais e está projetada para 130.000), não “respondendo” a eventuais variações de volume tratado e/ou de carga poluente tratada. Face ao exposto, e aos resultados alcançados no modelo, considera-se que este não é capaz de fornecer uma aproximação relevante, que permita projetar os consumos futuros da instalação e avaliar a adequabilidade dos valores de consumo registados em períodos subsequentes ao período de referencia utilizado.

Na tabela seguinte apresenta-se o desvio padrão dos consumos mensais de energia, a média mensal de consumos e a variação dos consumos de energia face aos consumos médios registados para cada instalação. Esta análise permite analisar as variações de consumos existentes ao longo do ano e verificar a resposta dada às variações de carga poluente.

Tabela 6.16 – Variação de consumos mensais nas instalações em análise

	R^2	Desvio padrão (kWh)	Consumo médio mensal (kWh/mês)	Variação face ao consumo médio mensal (%)
ETAR A	0,28	461	16.291	2,8%
ETAR B	0,20	2.567	30.880	8,3%
ETAR C	0,17	5.313	66.105	8,0%
ETAR D	0,72	5.058	37.803	13,4%
ETAR E	0,19	7.880	56.622	13,9%
ETAR F	0,48	7.242	67.551	10,7%
ETAR G	0,52	11.156	62.824	17,8%
ETAR H	0,50	10.934	79.762	13,7%
ETAR I	0,62	5.418	43.294	12,5%
ETAR J	0,50	27.299	120.506	22,7%
ETAR K	0,21	15.621	104.090	15,0%
ETAR L	0,26	11.533	270.877	4,3%
ETAR M	0,84	10.019	247.764	4,0%

Da análise à tabela anterior é possível verificar a problemática referida na análise da ETAR “L”. A relação entre o desvio padrão dos consumos mensais da instalação e o consumo médio mensal verificado para o ano em causa revela que apenas existe uma variação de cerca de 4,3%. Esta pequena variação poderá indiciar, tal como referido anteriormente e tendo em causa as condições de operação da ETAR em causa, uma fraca resposta às variações das cargas poluentes afluentes à instalação. Desta forma, a definição de um modelo de previsão de consumos em função da variação da carga poluente poderá ser inviável.

Para a ETAR “M”, esta variação também representa cerca de 4%. Contudo, o facto da ETAR em causa estar a operar consideravelmente abaixo das suas capacidades (a população equivalente de projeto é cerca de 153.878 hab.eq. e atualmente serve cerca de 40.000 hab.eq), e as interligações à sua rede de tratamento não estarem todas efetuadas, poderá fazer com que as variações da carga poluente não se “sintam” no funcionamento da instalação. Note-se, no entanto, que o valor de R^2 obtido na determinação do modelo de regressão multivariável apresentado para esta instalação é claramente beneficiado da utilização de 36 meses, tal como apresentado na análise à ETAR “M” efetuada no presente capítulo.

Torna-se importante realçar que o “peso” do desvio padrão no consumo médio mensal poderá ser influenciado por fatores de ocupação sazonal das zonas abrangidas pelas instalações ou da forma como a operação é efetuada. No primeiro caso, o aumento da população em determinadas alturas do ano poderá levar a um aumento da carga poluente a tratar, pelo que torna-se necessário aumentar o nível de tratamento do volume de água afluente. No segundo caso, as variações de carga poluente em instalações que fazem operar as diversas etapas de tratamento em função de parâmetros de controlo (p.ex. potencial redox ou oxigénio dissolvido no tanque biológico) podem levar a que os consumos sejam variáveis em função da carga poluente existente na água a tratar.

7. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA

Dada a ausência de uma relação direta de proporcionalidade entre o consumo de energia e cada uma das variáveis potencialmente influenciadoras do consumo energético das instalações em estudo, assim como, a dificuldade em definir modelos de regressão multivariáveis válidos para cada uma das instalações, torna-se necessário recorrer a modelos mais abrangentes.

É neste sentido que é desenvolvida e avaliada, no presente capítulo, uma metodologia cujo objetivo se prende com a avaliação do desempenho energético de ETAR. Esta é desenvolvida com recurso a uma análise de regressão multivariável, tendo por base dados mensais de um conjunto de instalações que servirão de base comparativa para a determinação do desempenho energético relativo de uma dada instalação.

7.1 Base Metodológica

O modelo idealizado baseia-se na utilização dos dados mensais de variáveis habitualmente aferidas

Tendo em conta a forma como as ETAR operam, assim como os diversos parâmetros aferidos regularmente procurou-se, juntos das diversas entidades, recolher um conjunto de dados mensais (12 meses compreendidos entre Janeiro e Dezembro) habitualmente utilizados no controlo dos processos de tratamento, de forma a relacionar estas variáveis com os consumos energéticos destas instalações.

O conjunto dos dados recolhidos referem-se, essencialmente, aos consumos energéticos mensais de cada instalação, ao volume de afluente tratado e à carga poluente a montante e a jusante do processo de tratamento (CBO, CQO e SST). A contabilização da carga poluente sofreu algumas alterações em comparação com a forma como esta era feita nos modelos de regressão multivariável desenvolvidos no âmbito do caso de estudo (análise individual). Note-se que estes parâmetros foram calculados, em kg/mês, e a sua contabilização feita tendo em conta a carga que afluía à ETAR, desprezando a que era descarregada no meio ambiente. Na presente abordagem, estes parâmetros passam a representar a quantidade de carga poluente removida, entrando em conta com a carga poluente que sai das instalações, tal como utilizado no cálculo do consumo específico de energia presente no capítulo 6.5.1.

A definição do modelo em causa permite avaliar o desempenho energético de cada ETAR, de forma relativa, isto é, fazendo uma análise comparativa tendo por base uma determinada amostra de instalações. A sua caracterização permite que qualquer instalação, devidamente enquadrada, utilize os registos das diversas variáveis (volume tratada e carga poluente) com vista à obtenção de um valor de consumo de energia expectável para uma instalação com características semelhantes à sua. Para tal, foi utilizada uma metodologia desenvolvida com base numa análise de regressão multivariável, semelhante à utilizada na caracterização dos consumos de referências de cada ETAR e desenvolvida no âmbito do caso de estudo anteriormente apresentado. Desta forma, foi avaliada, com o recurso à função *Data Analysis* do *software Microsoft Excel 2013* e tendo por base os registos relativos à qualidade do afluente disponibilizados, a existência de um modelo de regressão multivariável, estatisticamente válido, que relacione, de forma conjunta, os consumos de energia com os dados volumétricos e qualitativos disponíveis.

O modelo utilizado assentou numa regressão linear do tipo:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + e \quad (16)$$

Em que:

Y representa a variável dependente definida como o consumo mensal de energia, em kWh, incluindo a energia gerada por meios próprios e consumida na instalação e definida durante um período de tempo específico;

X_i ($i=1,2,3,\dots,n$) representa as 'n' variáveis independentes;

b_i ($i=1,2,\dots,n$) representa os coeficientes de cada uma das variáveis independentes

b_0 corresponde a um coeficiente fixo que não depende das variáveis independentes

'e' representa os erros inexplicados após a justificação do impacto das variáveis independentes. Esta análise encontra o conjunto dos valores b_i que fazem a soma dos termos de erro residual ao quadrado o mais próximo possível de zero (método dos mínimos quadrados).

Tendo em conta o objetivo, foi definido o consumo de energia como sendo a variável dependente (Y) que é modelada como sendo regida por variáveis independentes (X_i), usualmente denominadas por variáveis explicativas. Neste exercício em concreto, foram consideradas como variáveis independentes o volume de água tratada e a carga poluente afluente nos seus três parâmetros (CBO, CQO e SST).

Uma vez estabelecidas as variáveis a utilizar no âmbito do modelo torna-se necessário definir indicadores que visem a sua validação. Para tal, utilizaram-se para efeitos de validação os seguintes indicadores: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa e estatística-t.

✓ Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação surge como o primeiro passo na avaliação da exatidão de um modelo. Esta permite avaliar a proporção da variação total da variável dependente (Y) explicada pelas variáveis independentes (X). Para a presente análise, o coeficiente de determinação é dado por:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (17)$$

Onde:

Y_i = valor de energia realmente observado (p.e. dados de faturas ou telecontagem)

\hat{Y}_i = Valor de energia prevista pelo modelo para um conjunto de dados, usando os valores medidos das variáveis independentes

\bar{Y} = Média dos n valores de energia medida

Tal como referido no capítulo 5 da presente dissertação, este coeficiente varia entre 0 e 1, sendo que zero significa que nenhuma variação é explicada pelo modelo, não fornecendo nenhuma orientação para a compreensão das variações em Y. Para um coeficiente de determinação de 1, pode dizer-se que o modelo explica 100% das variações em Y. A utilização deste coeficiente surge como uma verificação inicial e pode indiciar uma boa relação entre as variáveis independentes e a dependente, caso o seu valor seja superior a 0,75, ou uma má relação para valores inferiores a 0,75. Contudo, uma análise baseada somente no coeficiente de determinação

não deve ser considerada, uma vez que este é influenciado pelo declive da sua linha de tendência. Note-se que linhas de tendência com maior declive têm tendência a produzir um coeficiente de desempenho superior a linhas com declives mais baixos. Esta é uma das razões pela qual a rejeição ou aceitação dos modelos não pode assentar somente no valor deste coeficiente.

✓ Erro padrão da estimativa

Quando um modelo é concebido para a previsão de um dado valor (p.e energia consumida) baseado nas variáveis independentes utilizadas, a exatidão da sua previsão é medida através do erro padrão da estimativa ($SE_{\hat{y}}$), também designado por erro médio quadrático, e que é dado por:

$$EP_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n - p - 1}} \quad (18)$$

Onde:

p = número de variáveis independentes na equação de regressão

n = número de observações

É importante realçar que em virtude da inserção dos valores das variáveis independentes no modelo de regressão de forma a estimar o valor da variável dependente, podem resultar desvios relativamente ao seu resultado real, também designado por alcance. O alcance que o valor previsto da variável dependente pode tomar é calculado através da seguinte forma:

$$\hat{Y} \pm t \times EP_{\hat{y}} \quad (19)$$

Onde:

\hat{Y} é o valor previsto da variável dependente do modelo de regressão

t é o valor obtido a partir da tabela de distribuição *t* de *student*

$EP_{\hat{y}}$ é o erro padrão da estimativa

O quociente entre o erro padrão da estimativa e a variável dependente real, que neste caso assume-se como o consumo de energia mensal, permite determinar o coeficiente de variação do erro médio quadrático ($CV(RMSE)$) e que pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$CV(RMSE) = \frac{EP_{\hat{y}}}{\bar{Y}} \quad (20)$$

Este coeficiente permite aferir o “peso” que o erro padrão do modelo tem no consumo médio de energia da amostra em análise, devendo considerar-se aceitáveis os valores inferiores a 0,05. (Spiegel, 1977)

✓ Estatística-t

Dado que os coeficientes presentes no modelo de regressão ($b_0, b_1, b_2 \dots b_n$) são estimativas da verdadeira relação entre cada uma das variáveis independentes e a variável dependente, estas podem estar sujeitas a variações. A precisão da estimativa pode ser determinada através do erro

padrão de cada coeficiente e o valor associado da sua estatística-t. O erro padrão calculado para os coeficientes de cada variável independente é dado através da seguinte equação:

$$EP_b = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \hat{Y})^2 / (n - 2)}{\sum(X_i - \bar{X})^2}} \quad (21)$$

A determinação do erro padrão do coeficiente permite determinar o valor da estatística-t para determinada variável. Desta forma é possível determinar se o coeficiente calculado se assume como estatisticamente significativo para a definição do modelo. A estatística-t pode ser calculada através da seguinte formula:

$$Estatística - t = \frac{b}{EP_b} \quad (22)$$

Após calculado, o valor da estatística-t é comparado com os valores críticos de t definidos em tabelas dedicadas para o efeito tal como a apresentada no Anexo X. A validação de uma variável independente, assim com a sua respetiva utilização no modelo, pressupõe que o valor absoluto de t calculado, ultrapasse o número critico da tabela de distribuição t de *student*.

Tal como anteriormente referido para a variável dependente estimada, o facto dos coeficientes serem estimativas da relação entre a variável dependente e independente leva a que a sua estimativa esteja sujeita a uma variação (alcance). O alcance dentro do qual o verdadeiro valor do coeficiente se encontra é determinado da seguinte forma:

$$b \pm t \times EP_b \quad (23)$$

Onde:

b é o valor do coeficiente

t é o valor obtido a partir do quadro t

EP_b é o erro padrão do coeficiente

É importante realçar que a validação de cada uma das variáveis independentes também poderá ser validada com recurso ao valor p (*p value*). Este valor, existente para cada uma das variáveis em análise, permite fazer uma comparação com o nível de significância do modelo ($\alpha = 0,05$ para um intervalo de confiança de 95%). Caso o valor p, determinado para cada uma das variáveis, seja inferior ao nível de significância previamente definido, pode afirmar-se que a variável analisada é significativa para explicar a variação da variável dependente, tal como apresentado no teste de hipóteses seguinte:

$$\begin{cases} H_0: b_n = 0 \\ H_1: b_n \neq 0 \end{cases}; n = 1$$

$$\begin{cases} H_0: A \text{ variável não é significativa para explicar o variação no modelo} \\ H_1: A \text{ variável é significativa para explicar a variação no modelo} \end{cases} \quad (24)$$

Em que se rejeita H_0 se $\text{Sig} < 0,05$

Os testes e indicadores em causa revelam-se da maior importância para a validação deste tipo de modelo, uma vez que permitem reduzir a introdução de vários tipos de erros. Alguns destes erros podem estar relacionados com a não inclusão de variáveis independentes relevantes levando a que existam relações tendenciosas ou a introdução de dados pouco representativos das condições de funcionamento das ETAR utilizadas.

✓ Teste F

Um dos teste comumente utilizados na avaliação de modelos de regressão é o Teste F. Este teste avalia a significância global do modelo e verifica se alguma variável utilizada é significativa para o modelo. A sua validação rege-se segundo o teste de hipóteses seguinte:

$$\begin{cases} H_0: b_1 = b_2 = b_n = 0 \\ H_1: \exists x: b_2 \neq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Sendo que,

$$\begin{cases} H_0: O \text{ modelo não é significativo} \\ H_1: Existe pelo menos uma variável significativa para explicar a variação de y \end{cases}$$

A rejeição da hipótese nula no presente teste é dada através da comparação entre a significância do teste F e o nível de significância definido. Caso a significância de F seja inferior ao nível de significância, pode rejeitar-se a hipótese nula, o que leva a que se possa afirmar que pelo menos uma das variáveis utilizadas é significativa para explicar a variação do consumo de energia (variável dependente).

7.2 Análise Global

No presente capítulo procurou-se desenvolver um modelo que permita aferir o nível de desempenho energético que uma dada instalação tem num determinado período de tempo (mês ou ano), tendo como base comparativa um conjunto de instalações. A sua caracterização permite a qualquer instalação, devidamente enquadrada, a utilização dos dados de carga poluente e volume tratado, tendo em vista a determinação de um valor de consumo de energia expectável, para uma instalação com características semelhantes à sua. Note-se que a pesquisa bibliográfica efetuada permitiu identificar exemplos de grupos de trabalho (Silva & Rosa, 2015), ou programas nacionais (Energy Star, 2014), que têm vindo a direcionar a sua pesquisa nesta área com o objetivo de tornar o sector do tratamento de águas energeticamente mais eficiente e competitivo.

Neste modelo são utilizadas variáveis semelhantes às anteriormente utilizadas no âmbito dos modelos individuais. Contudo, foram consideradas algumas alterações, nomeadamente, a contabilização da carga poluente removida, em todas as suas vertentes, e a exclusão de outliers existentes no conjunto de dados utilizados. As referidas alterações encontram-se explicitadas nos capítulos seguintes.

7.2.1 Definição do Modelo e Apresentação de Resultados

Tendo em conta que se trata de uma análise de regressão multivariável torna-se necessário definir quais as variáveis dependentes e independentes a utilizar. Assim, define-se como variável dependente o consumo energético mensal e como variáveis independentes considera-se o volume mensal de afluente tratado e as cargas poluentes mensalmente removidas (CBO, CQO e SST), devidamente calculadas com base na Equação 9.

A utilização do conjunto de dados recolhidos torna necessária a sua verificação, para que não sejam incluídos dados espúrios na base do modelo. De forma a responder a esta problemática, causada por fatores relacionados com o funcionamento inadequado de sistemas de medição ou de situações anómalas das instalações, foi efetuada a aferição dos *outliers*, presentes na amostra, com recurso à técnica da distância de *Mahalanobis*. No Anexo XI apresenta-se a descrição, assim como uma breve explicação, da distância de Mahalanobis aplicada na remoção dos outliers

O tratamento dos outliers, segunda a técnica supracitada, foi efetuado com recurso ao software *IBM SPSS Statistics 22*, habitualmente utilizado no âmbito de processo de análise estatística.

Uma vez definidos os dados caracterizados como outliers, procedeu-se à sua remoção do conjunto de dados a utilizar na definição do modelo, dado que a sua conservação poderia ter implicações no aumento dos erros a si associados. No Anexo XII apresentam-se os dados devidamente tratados (com exclusão de *outliers*) utilizados na definição do modelo global de consumos.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores de interesse obtidos, com recurso à função *Data Analysis* do software *Microsoft Excel 2013* para o modelo que apresentou melhores resultados, nomeadamente aquele que relaciona os consumos de energia mensais (kWh/mês) com o volume mensal de afluente tratado (m³) e a carga de CQO removida (kg/mês), referentes ao meses do ano de 2013.

Tabela 7.1 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados do modelo global

ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO					
Coefficiente de determinação	CV (RMSE)	Erro Padrão	Erro do modelo matemático (%)	Significância de F	Número de observações
0,91	0,249	20.640	0,00	5,7E-62	143

Tabela 7.2 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados das variáveis independentes

Parâmetro	Coefficiente	Erro Padrão	Stat T	Valor P	95% Inferior	95% Superior
Ordenada na origem	22.009,7	2.701,2	8,15	1,9E-13	16.669	27.350
Afluente (m3)	0,24	0,03	7,24	2,7E-11	0,17	0,30
CQO Removido (kg/mês)	0,41	0,03	12,47	1,8E-24	0,34	0,47

Da análise aos resultados apresentados nas Tabelas 7.1 e 7.2, destacam-se diversas questões relacionadas com a globalidade do modelo e com cada uma das variáveis independentes utilizadas na sua definição.

As estatísticas de regressão obtidas para a globalidade do modelo evidenciam algumas questões pertinentes, nomeadamente aquelas relacionadas com o valores obtidos para o coeficiente de determinação (R^2) e para o coeficiente de variação do erro médio quadrado (CV(RMSE)). Os resultados alcançados mostram um coeficiente de determinação consideravelmente alto (91%), tendo em conta o limite mínimo (75%) habitualmente considerado em exercícios de regressão multivariável (Chatterjee & Hadi, 2012). O valor alcançado poderá indicar que 91% das variações registadas na variável dependente (consumo mensal de energia) podem ser explicadas pelo conjunto de variáveis independentes utilizadas.

Por outro lado, o coeficiente de variação do erro médio quadrado (CV(RMSE)) definido como o quociente entre o erro padrão e o consumo médio de energia obteve um valor que ultrapassa largamente o limite máximo aceitável (0,05), segundo a metodologia utilizada.

A significância global do modelo, determinada com recurso ao teste F, revelou-se bastante satisfatória. Note-se que o valor obtido ($5,7E-62$) é consideravelmente inferior ao nível de significância utilizado no âmbito da presente análise (0,05), permitindo rejeitar a hipótese nula definida na equação 22 do capítulo 7.1 da presente dissertação. O resultado alcançado permite afirmar, pelo menos, uma das variáveis utilizadas é significativa para explicar a variação do consumo de energia (variável dependente).

Na avaliação da adequação de cada variável independente do modelo em causa, torna-se essencial analisar o valor p associada a cada uma. Os resultados obtidos indicam que ambas as variáveis utilizadas obtiveram valor de “p” extremamente satisfatórios no que toca à sua validação estatística. Tendo em conta o teste de hipóteses apresentado anteriormente, e uma vez definido 0,05 como nível de significância do modelo (intervalo de confiança de 95%), é possível proceder à rejeição da hipótese nula (H_0), uma vez que os valores “p” de cada uma revelam-se muito inferiores ao limite máximo admitido ($2,7E-11$ para o volume afluente e $1,8E-24$ para o CQO removido), permitindo afirmar que ambas as variáveis utilizadas são significativas para explicar as variações da variável dependente.

Desta forma, e tendo por base os resultados alcançados correspondentes às séries de dados utilizadas, é possível assumir que consumos de energia mensais das ETAR podem ser definidos através da equação abaixo apresentada.

$$\begin{aligned} \text{Consumo } EE_{(kWh/mês)} &= 22.009,7 + (0,24 \times \text{Volume Afluente}_{(m^3/mês)}) \\ &+ (0,41 \times \text{CQO removido}_{(kg)}) \end{aligned} \quad (25)$$

Apesar dos resultados alcançados revelarem-se satisfatórios, com exceção para o coeficiente de variação (CV(RMSE)), é da máxima importância realçar-se que o modelo definido pode ser tremendamente influenciados pelos dados relativos às ETAR de maiores dimensões, tal como observável na Figuras 7.1 e 7.2.

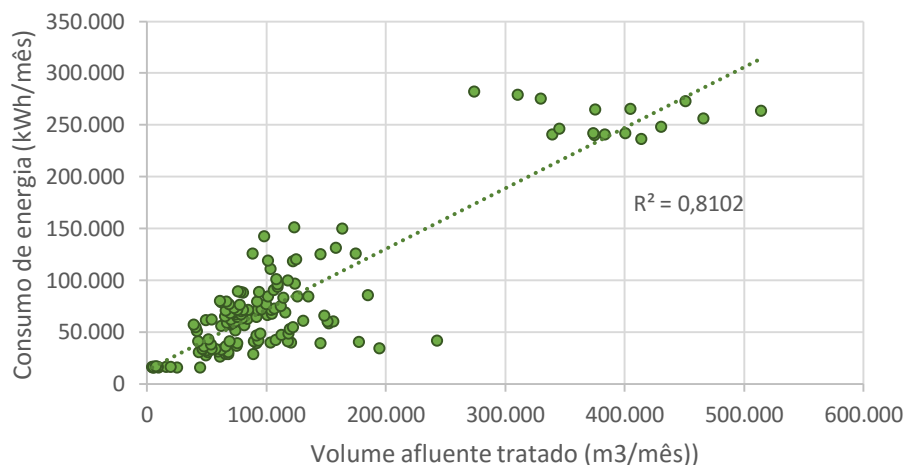


Figura 7.1 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (Volume afluente tratado)

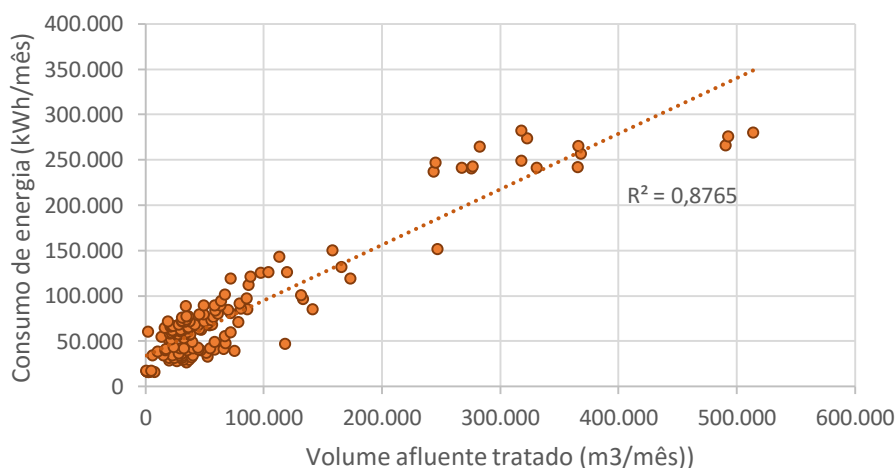


Figura 7.2 – Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (CQO Removido)

A análise à figura 7.1 e 7.2 permite verificar a grande dispersão de dados existente aquando da representação da relação entre cada uma das variáveis independentes e a variável dependente utilizada.

A remoção dos dados referentes às ETAR cujos consumos energéticos se revelam consideravelmente mais elevados do que grande parte da amostra em análise, permitiu reduzir a dispersão de dados. Nas Figuras 7.3 e 7.4 apresentam-se as relação existentes (tal como apresentado nas Figuras 7.1 e 7.2) entre os consumos energéticos e as duas variáveis independentes utilizadas no modelo em causa.

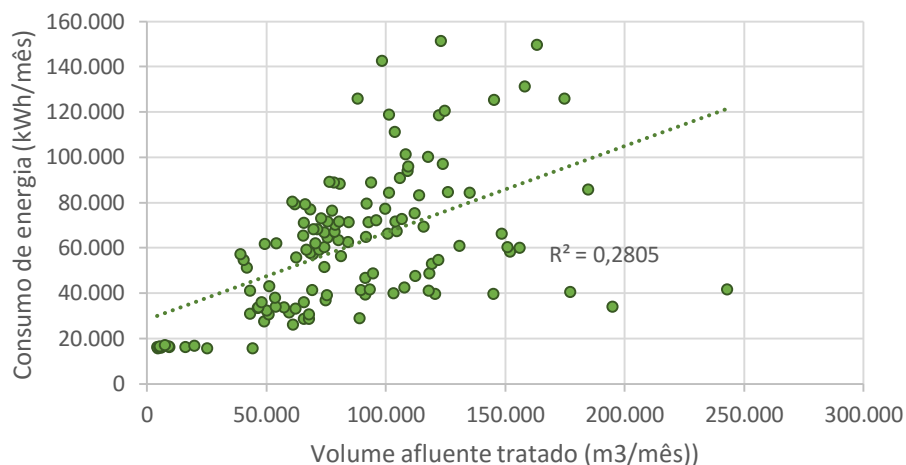


Figura 7.3 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (Volume afluente tratado)

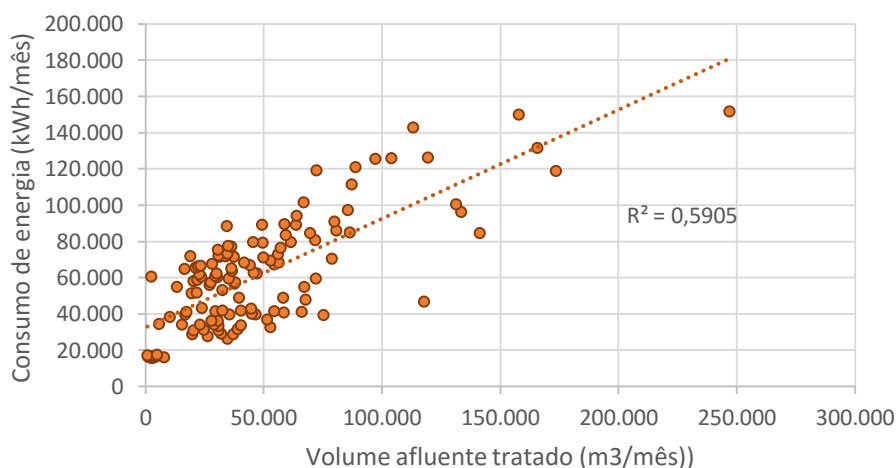


Figura 7.4 - Relação entre a variável dependente (Consumo de energia) e independente (CQO Removido)

Quando comparadas, as figuras anteriores (7.3 a 7.4) tornam evidente a diminuição abrupta do coeficiente de determinação calculado para cada uma das relações. Esta facto permite verificar que, sem os dados relativos às ETAR de maior dimensão a relação existente entre cada uma das variáveis independentes em análise e o consumo energético é consideravelmente menor. Assim, é expectável que os resultados obtidos no modelo anteriormente apresentado sejam “artificialmente satisfatórios”.

Desta forma, e tendo em conta a influência que os referidos pontos têm na avaliação da relação existente entre cada variável independente e dependente, é expectável que este aspeto suceda quando o exercício de análise de regressão multivariável é efetuado. Apresentam-se de seguida os resultados alcançado para o modelo reformulado.

Tabela 7.3 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados do modelo global

ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO					
Coefficiente de determinação	CV (RMSE)	Erro Padrão	Erro do modelo matemático (%)	Significância de F	Número de observações
0,62	0,31	18.918	0,00	4,9E-27	124

Tabela 7.4 - Análise de regressão multivariável – Resumo dos resultados das variáveis independentes (modelo global)

Parâmetro	Coefficiente	Erro Padrão	Stat T	Valor P	95% Inferior	95% Superior
Ordenada na origem	23.469,4	3.814,3	6,2	9,7E-09	15.919,9	31.019,0
Afluente (m3)	0,15	0,05	3,30	1,3E-03	0,06	0,24
CQO Removido (kg/mês)	0,52	0,05	10,63	3,7E-19	0,43	0,62

Os resultados alcançados revelam, tal como expectável, uma diminuição considerável das estatísticas de regressão globais do modelo. Neste âmbito destaca-se a diminuição do coeficiente de determinação dos 0,91 para os 0,62, levando a que apenas 62% da variação dos consumos energéticos presentes na amostra possa ser justificada com a variação das variáveis dependentes utilizadas.

Apesar dos resultados de valor “p” obtidos permitirem verificar a sua importância na justificação da variação dos consumos de energia neste tipo de instalações, os coeficiente de cada uma, quando comparados com os do modelo anterior, sofreram algumas alterações. No valor de “p” relativo às variáveis independentes utilizadas (volume afluente e CQO removido) verificou-se um aumento quando comparado com o modelo inicialmente definido. Apesar de se revelarem superiores, os valores “p” associados a estas variáveis permitem rejeitar a hipótese nula (superior ao nível de significância) do teste de hipóteses apresentado anteriormente, considerando as variáveis significativa para o modelo.

Apesar das alterações registadas nos parâmetros acima referidos, não foram registadas alterações significativas no CV (RMSE), tendo obtido resultados muito próximos nas duas abordagens (0,25 e 0,31).

Face ao exposto, pode considerar-se que os resultados obtidos, tanto no modelo definido inicialmente como no modelo reformulado, não permitem a validação e consequente utilização do modelo no fornecimento de aproximações relevantes que permitam projetar os consumos energéticos das instalações e avaliar, de forma relativa, o desempenho energéticos de ETAR

7.2.2 Utilização do Modelo e Coeficiente de Desempenho

Apesar da impossibilidade de validar o presente modelo do ponto de vista estatístico, torna-se essencial descrever a forma como este poderia ser utilizado na avaliação do desempenho energético deste tipo de instalações.

Tendo em conta o tipo de análise estatística utilizada (análise de regressão multivariável) seria fundamental enquadrar a tipologia da ETAR a avaliar, no conjunto de instalações utilizadas na génese do modelo. Desta forma, deveriam ser consideradas, unicamente, instalações cujo seu processo de tratamento se enquadrasse no tratamento por lamas ativadas, e cuja sua dimensão (considerando a população equivalente de projeto) estivesse compreendida entre o maior e menor valores de população equivalente existentes no modelo ($6.330 \geq \text{pop.eq.} \leq 130.000$).

Uma vez enquadrada, seria necessário proceder à recolha dos dados essenciais na utilização do modelo. Para tal, como referido anteriormente, seria necessária a recolha dos dados mensais de energia elétrica consumida, volume afluente tratado e carga de CQO removida. A introdução dos dados recolhidos no modelo permitiria a determinação dos consumos de energia expectáveis para uma instalação com características semelhantes à sua.

A aferição dos consumos energéticos expectáveis para as ETAR sujeita a um processo de avaliação deste tipo, possibilitaria a determinação de um indicador energético capaz de fornecer informação acerca do seu desempenho energético. A determinação do coeficiente de desempenho é dada por:

$$\text{Coeficiente de Desempenho} = \frac{\text{Consumo de energia expectável} \left(\frac{kWh}{\text{mês}} \right)}{\text{Consumo de energia real} \left(\frac{kWh}{\text{mês}} \right)} \quad (264)$$

A determinação do coeficiente de desempenho energético permitiria às várias instalações avaliar o nível de desempenho da sua instalação, numa base mensal, tendo em conta o desempenho do restante universo de instalações que compõem o modelo. Desta forma, a sua utilização possibilitaria o abandono da utilização dos indicadores comumente utilizado na avaliação do seu desempenho energético, que apenas contemplam a utilização de uma variável independente (consumo de energia/volume tratado, consumo de energia/carga poluente), levando, por vezes, à obtenção de considerações pouco corretas acerca do seu desempenho energético.

8. CONCLUSÕES

A análise efetuada aos dados decorrentes do trabalho de campo, permitiu verificar que o maior consumo de energia de uma ETAR, independentemente da sua dimensão, está localizado no processo de tratamento biológico. Note-se que a maioria dos consumos pertencentes a este processo está afeta ao processo de arejamento, responsável pela introdução de ar nos tanques biológicos.

Foi possível concluir que, em determinadas etapas (p.ex. Arejamento), os consumos energéticos variam em função da tecnologia utilizada e da forma como o seu funcionamento é estabelecido, tal como referido no relatório de melhores práticas para estações de tratamento de águas residuais elaborada pela WERF (Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: Best Practices and Case Studies of Novel Approaches, 2010).

A análise por dimensão de ETAR (tipologia) permitiu verificar que em estações de grande dimensão, construídas num passado recente e em que a sua atividade é feita no interior de edificado, existe a preocupação crescente com o tratamento do ar existente nas instalações e na sua periferia. Esta preocupação leva a que tenham sido instalados sistemas de desodorização que se têm revelado grandes consumidores de energia. Os resultados alcançados decorrentes das medições efetuadas durante o trabalho de campo permitiram determinar que os consumos energéticos associados a este processo podem representar, dependendo da sua dimensão, cerca de 16% do total de consumos de uma instalação.

Com o presente trabalho, foi possível concluir que as condições de uso e consumo de energia em sistemas de tratamento de águas residuais são afetados por diversas variáveis, revelando-se, consideravelmente, complexos e dinâmicos. A avaliação do caso de estudo e dos dados recolhidos na pesquisa bibliográfica evidenciou que os consumos de energia das ETAR variam em função dos volumes de água tratada, da carga poluente a tratar, tal como comprovado através das análises de regressão efetuadas ao longo do presente estudo, mas também do fator de carga associado a cada instalação.

A análise ao caso de estudo permitiu verificar a influência que os diferentes tipos de tecnologias de tratamento, e respetiva operação das mesmas, têm no nível de consumos das ETAR. A utilização de sondas que, em função das necessidades do processo, controlem o arranque e a paragem de equipamentos (p.ex. bombas ou compressores) permite a otimização do processo mas também a racionalização dos consumos de energia.

A análise efetuada permitiu verificar que os indicadores energéticos habitualmente utilizados na avaliação energética deste tipo de instalações, nomeadamente aqueles definidos no âmbito do SGCIE, não se revelam válidos na caracterização do desempenho energético de ETAR.

Desta forma, e tendo em consideração o caso de estudo apresentado, assim como o funcionamento deste tipo de instalações, é possível afirmar que a melhor forma de avaliar o seu desempenho energético passa por definir metodologias que relacionem as diferentes variáveis produtivas associadas ao seu processo de tratamento, tal como evidenciado através dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto *Energy Star Score* (2014) e do autores de “*Energy Performance Indicators of Wastewater Treatment: field study with 17 Portuguese plants*” (Silva & Rosa, 2015).

Tendo em consideração o trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação é importante destacar que a utilização da ferramenta matemática pode revelar-se útil na geração de modelos que permitam “explicar” a variação do consumo de energia resultante em função das variáveis independentes.

O conjunto de dados utilizados revelou-se pouco representativos do universo de instalações existentes no país (apenas foram consideradas 13 ETAR), tendo-se revelado uma questão crítica no que se refere à definição, avaliação e validação deste tipo de modelos. Neste âmbito, é necessário selecionar amostras de maior dimensão, de forma a criar condições que permitam desenvolver sistemas de contagem utilizados na quantificação dos consumos de energia e das variáveis independentes em causa (p.ex. volume tratado e carga poluente removida). Deverão, ainda, ser considerados sistemas de contagem que permitam a recolha de dados representativos das variáveis utilizadas nos processos de tratamento de águas residuais e que alertem os utilizadores para a supressão de registos que estejam associados a situações de funcionamento anómalas.

A recolha dos dados deverá considerar a definição de conjuntos de instalações que possam representar uma determinada classe de ETAR, dando especial atenção às questões relacionadas com a sua dimensão, processos existentes, tipo de afluente e nível de automação em função de variáveis qualitativas. Este tipo de procedimento será essencial à definição de modelos globais que sirvam de base comparativa à avaliação do desempenho energético das instalações e que contemplem amostras representativas de tipologias atualmente existentes no panorama nacional. No mesmo contexto deverão ser consideradas plataformas que permitam a reunião e divulgação deste tipo de dados de forma estruturadas e de fácil acesso que possibilite o desenvolvimento de estudos que resultem num maior conhecimento das questões energéticas associadas a este sector.

Tal como abordado ao longo da presente dissertação, a aferição da qualidade do afluente de forma rápida e frequente revelou-se uma problemática habitual neste sector. Note-se que este tipo de registo baseia-se em análises laboratoriais, morosas e dispendiosas, que inviabilizam a sua determinação frequentemente. O aparecimento de sondas que permitam a determinação instantânea deste tipo de parâmetros poderá revelar-se essencial para a caracterização da carga poluente tratada, possibilitando o desenvolvimento de estudos que procurem um melhor conhecimento acerca da forma como estas variáveis influenciam os consumos energéticos deste tipo de instalações.

9. TRABALHO FUTURO

O presente estudo baseia-se num conjunto de dados recolhidos de uma pequena amostra de ETAR com pouca representatividade no panorama de instalações em Portugal. O alargamento do número de instalações a analisar e consequente inclusão de novos dados acerca dos seus consumos energéticos, volume tratado e carga poluente, poderá contribuir de forma relevante para um conhecimento mais aprofundado acerca da forma como estas variáveis influenciam os consumos energéticos. Neste contexto, sugere-se que sejam analisadas metodologias de desempenho energético, semelhantes à abordada no presente trabalho, com a utilização de um maior conjunto de dados.

A qualidade e representatividade dos dados de carga poluente afluente às instalações condiciona, tal como referido anteriormente, a definição de modelos de consumos. Uma monitorização mais constante deste tipo de parâmetros possibilitaria a recolha de informação pertinente que possibilitasse a definição e validação de modelos que permitam estimar os consumos energéticos das ETAR, através da utilização de uma metodologia análoga à adotada no âmbito da presente dissertação.

10. BIBLIOGRAFIA

- Águas do Algarve. (22 de junho de 2015). Obtido de <http://www.aguasdoalgarve.pt>:
<http://www.aguasdoalgarve.pt/content.php?c=105>
- Alex Lekov, L. T. (2009). *Opportunities for Energy Efficiency and Open Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California*.
- Almeida de Sousa, V. M. (2009). *Estudo das emissões gasosas por processos de desodorização*.
- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline - Measurement of Energy and Demand Savings*.
- Bachurova, A. (10 de Maio de 2012). www.iwawaterwiki.org. Obtido de www.iwawaterwiki.org:
<http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/EnergyEfficiencyforUrbanWaterandWastewaterServices>
- Balmér, P., & Hellstrom, D. (2012). Performance indicators for wastewater treatment plants.
- Bodik, I., & Kubaská, M. (2013). *Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant*.
- Bolles, S. A. (2013). *Modeling Wastewater Aeration Systems to Discover Energy Savings Opportunities*.
- Bolles, S. A. (n.d). *Modeling Wastewater Aeration Systems to Discover*.
- Burton, F. L. (1996). *Water and Wastewater industries: Characteristics and Energy Management Opportunities*.
- Catarino, J., & Henriques, J. (2015). *Ecoefficiency in portuguese WWTP*.
- Catarino, J., Henriques, J. J., Maia, A., Alexandre, J., Camocho, D., & Rodrigues, F. (2007). *Manual Valor Sustentável*.
- Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2012). *Regression Analysis by example*. Wiley.
- Chernicharo, C. A. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series - Anaerobic Reactor*.
- Decreto-Lei, 152/97 (97).
- Descoins, N., Deleris, S., Lestienne, R., Trouvé, E., & Marechal, F. (2010). Energy efficiency in waste water treatments plants: Optimization of activated.
- DGEG. (2015). *Balanço Energético - Sintético - 2014*.
- Di Berardino, S. (2001). *Técnicas de Gestão Ambiental*.
- Eawag, & Dorothee Spuhler. (s.d.). Activated Sludge. *Sustainable Sanitation and Water Management*.

- Energy Star. (2014). *Energy Star Score for Wastewater treatment plants in the United States*.
- Energy Star. (2015, Janeiro). *Portfolio Manager - Energy Use in Wastewater Treatment Plants*.
- Environmental Dynamics International. (2005). Energy Consumption and Typical Performance of Various Types of Aeration Systems. *Technical Bulletin 127*.
- Environmental Protection Agency. (2013). *Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities*.
- Europeu, C. (2014). *Conclusões sobre o Quadro de ação relativo ao Clima e à Energia para 2030*.
- Eurostat. (Agosto de 2015). <http://ec.europa.eu>. Obtido de <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdec360&plugin=1>
- Eurostat. (7 de Agosto de 2015). http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics#Wastewater_treatment. Obtido de <http://ec.europa.eu/eurostat/>: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Water_statistics#Wastewater_treatment
- EVO - Efficiency Valuation Organization. (2009). *Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético*.
- EVO. (2009). *Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético*.
- Ferreira, R. F. (1982). *Gestão Financeira - Parte I*. Universidade Católica Portuguesa.
- Focus on Energy. (2006). *Water and Wastewater Industry - Energy Best Practice Guidebook*.
- Hamilton, G., & Arzbaeher, C. (2009). *Driving Energy Efficiency in the U.S. Water & Wastewater Industry*.
- Henriques, J., & Catarino, J. (2015). *Ecoefficiency in Portuguese WWTP*.
- I. Bodík, S. S. (2011). *Biogas Production in Municipal Wastewater Treatment Plants –Current Status in EU with a Focus on the Slovak Republic*. Bratislava.
- IBNET. (21 de May de 2015). Obtido de www.ib-net.org: https://www.ib-net.org/en/texts.php?folder_id=128&mat_id=106&L=1&S=2&ss=1
- INNERS. (n.d). Innovative energy recovery strategies in the urban water cycle.
- Jenness Enterprises. (Fevereiro de 2016). Obtido de http://www.jennessent.com/arcview/mahalanobis_description.htm
- Maia, A., Rodrigues, F., Catarino, J., Henriques, J., Alexandre, J., & Camocho, J. (2005). *Criar Valor Sustentável - Caso de estudo MRodrigues*.

- Matos, R., Duarte, P., Molinari, A., & Schulz, A. (2003). *Performance Indicators for Wastewater Services*. London: IWA Publishing.
- Menendez, M. R. (n.d.). *How we use energy at wastewater plants and how we use less*.
- Metcalf, & Eddy. (1997). *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal and Reuse*. McGRAW-Hill International Editions.
- Ministério da Economia e da Inovação. (2008). *Despacho n° 17313/2008*.
- Monroe Environmental. (Agosto de 2015). www.monroeenvironmental.com. Obtido de <http://www.monroeenvironmental.com/water-and-wastewater-treatment/circular-clarifiers>
- Natural Resources Canada's CanmetENERGY. (Março de 2008). Overview of Different Measurement and Verification - (M&V) Protocols.
- New Mexico Environment Department. (2007). *Wastewater systems - Operator Certification*. Santa Fe.
- NYSERDA. (2008). *Statewide Assesment of Energy Use by the Municipal Water and Wastewater Sector*. New York.
- (2014). *PENSAAR 2020*.
- Quadros, S., Rosa, M. J., Alegre, H., & Silva, C. (2010). A Performance Indicators System for Urban Wastewater Treatment Plants.
- Ramón Sala-Garrido, F. H.-S.-S. (2012). Assessing the efficiency of wastewater treatment plants in a uncertain context: a DEA with tolerances approach.
- Schneider Eléctric. (2014). *Relatório de Diagnóstico Energético em Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR "G"*.
- Schneider Electric. (2014). *Relatório de Diagnóstico Energético em Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR "K"*.
- Schneider Electric. (2015). *Relatório de Diagnóstico Energético em Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR "B"*.
- Schneider Electric. (2015). *Relatório de Diagnóstico Energético em Estações de Tratamento de águas Residuais - ETAR "D"*.
- Schneider Electric. (2015). *Relatório de Diagnóstico Energético em Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR "L"*.
- Serra, A. (2012). *Parceria Portuguesa para a água no centro das decisões da estratégia*. AdP - Águas de Portugal.

- Silva, C., & Rosa, M. (2015). Energy Performance Indicators of Wastewater Treatment: a field study with 17 Portuguese plants.
- Silva, M. G. (2014). *Gestão de Consumos de Energia na Indústria – análise crítica e contributos para a reformulação do SGCIE*.
- Simarsul. (2013). *Manual de funcionamento da ETAR "K"*.
- Sperling, M. V. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal (Vol I)*. IWA Publishing.
- Sperling, M. V., & Chernicharo, C. d. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions (Vol. I)*. IWA Publishing.
- Spiegel, M. R. (1977). *Theory and problems of probability and statistics*. Connecticut: McGraw-Hill.
- Stahre, P., Adamsson, J., & Eriksson, O. (2000). Nyckeltal inom VA - En introduktion.
- Stenstrom, M. K., & Rosso, D. (2010). Aeration.
- Templeton, D. M., & Butler, P. D. (2011). *Introduction to Wastewater Treatment*.
- USEPA. (2008). *An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities*.
- Wei, X. (2013). *Modeling and optimization of wastewater*.
- Wennerholm, E. (2014). Performance Indicator Analysis as a Basis for Process Optimization and Energy Efficiency in Municipal Wastewater Treatment Plants.
- WERF. (2010). *Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: Best Practices and Case Studies of Novel Approaches*.
- Xie, T., & Chengwen, W. (2012). Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China., (p. 7).
- Yang, L., Zeng, S., Chen, J., He, M., & Yang, W. (2010). Operational Energy Performance Assessment System of Municipal Wastewater Treatment Plants.

11. ANEXOS

ANEXO I – DETERMINAÇÃO DO ENERGY STAR SCORE

ENERGY STAR Score	Cumulative Percent	Energy Efficiency Ratio		ENERGY STAR Score	Cumulative Percent	Energy Efficiency Ratio	
		>=	<			>=	<
100	0%	0.0000	0.2699	50	50%	0.8752	0.8846
99	1%	0.2699	0.3168	49	51%	0.8846	0.8940
98	2%	0.3168	0.3496	48	52%	0.8940	0.9035
97	3%	0.3496	0.3757	47	53%	0.9035	0.9130
96	4%	0.3757	0.3980	46	54%	0.9130	0.9227
95	5%	0.3980	0.4177	45	55%	0.9227	0.9325
94	6%	0.4177	0.4356	44	56%	0.9325	0.9424
93	7%	0.4356	0.4520	43	57%	0.9424	0.9523
92	8%	0.4520	0.4674	42	58%	0.9523	0.9625
91	9%	0.4674	0.4818	41	59%	0.9625	0.9727
90	10%	0.4818	0.4955	40	60%	0.9727	0.9831
89	11%	0.4955	0.5085	39	61%	0.9831	0.9936
88	12%	0.5085	0.5211	38	62%	0.9936	1.0043
87	13%	0.5211	0.5332	37	63%	1.0043	1.0152
86	14%	0.5332	0.5449	36	64%	1.0152	1.0262
85	15%	0.5449	0.5562	35	65%	1.0262	1.0375
84	16%	0.5562	0.5673	34	66%	1.0375	1.0489
83	17%	0.5673	0.5780	33	67%	1.0489	1.0606
82	18%	0.5780	0.5886	32	68%	1.0606	1.0725
81	19%	0.5886	0.5989	31	69%	1.0725	1.0847
80	20%	0.5989	0.6091	30	70%	1.0847	1.0972
79	21%	0.6091	0.6191	29	71%	1.0972	1.1099
78	22%	0.6191	0.6289	28	72%	1.1099	1.1230
77	23%	0.6289	0.6386	27	73%	1.1230	1.1364
76	24%	0.6386	0.6482	26	74%	1.1364	1.1502
75	25%	0.6482	0.6577	25	75%	1.1502	1.1644
74	26%	0.6577	0.6671	24	76%	1.1644	1.1791
73	27%	0.6671	0.6764	23	77%	1.1791	1.1942
72	28%	0.6764	0.6856	22	78%	1.1942	1.2099
71	29%	0.6856	0.6948	21	79%	1.2099	1.2262
70	30%	0.6948	0.7039	20	80%	1.2262	1.2431
69	31%	0.7039	0.7129	19	81%	1.2431	1.2607
68	32%	0.7129	0.7219	18	82%	1.2607	1.2791
67	33%	0.7219	0.7309	17	83%	1.2791	1.2984
66	34%	0.7309	0.7399	16	84%	1.2984	1.3187
65	35%	0.7399	0.7488	15	85%	1.3187	1.3402
64	36%	0.7488	0.7577	14	86%	1.3402	1.3630
63	37%	0.7577	0.7667	13	87%	1.3630	1.3872
62	38%	0.7667	0.7756	12	88%	1.3872	1.4133
61	39%	0.7756	0.7845	11	89%	1.4133	1.4415
60	40%	0.7845	0.7934	10	90%	1.4415	1.4722
59	41%	0.7934	0.8024	9	91%	1.4722	1.5060
58	42%	0.8024	0.8114	8	92%	1.5060	1.5438
57	43%	0.8114	0.8204	7	93%	1.5438	1.5866
56	44%	0.8204	0.8294	6	94%	1.5866	1.6365
55	45%	0.8294	0.8385	5	95%	1.6365	1.6963
54	46%	0.8385	0.8476	4	96%	1.6963	1.7717
53	47%	0.8476	0.8567	3	97%	1.7717	1.8751
52	48%	0.8567	0.8659	2	98%	1.8751	2.0457
51	49%	0.8659	0.8752	1	99%	2.0457	>2.0457

ANEXO II – VOLUME DE ÁGUA RESIDUAL TRATADA ANUALMENTE

Volume Tratado (m³)													
	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Jan	25099	67735	151927	94589	79991	80402	115773	78836	177239	134942	123884	404487	514210
Fev	16065	61180	130800	93100	66766	75643	91414	65597	145081	125940	108148	339386	413759
Mar	44221	67735	155930	103075	100698	111901	148346	77420	242958	184618	174618	450821	613253
Abr	19669	65550	150900	88851	74107	104367	119195	72856	194749	80491	145161	375061	515991
Mai	7337	57413	103889	74784	54192	84387	68417	66124	120667	158007	122071	329391	430464
Jun	5879	50736	84107	53446	39134	72642	70307	60903	107830	103365	103592	311174	383241
Jul	5021	46568	74136	47784	44494	87901	75462	93880	118164	98198	109358	314312	374494
Ago	4189	43047	69599	53778	49178	99637	91904	117730	121991	88123	105783	273952	344964
Set	4430	48925	78458	50058	40465	71359	68240	76224	91446	101197	101284	310111	373446
Out	9144	62093	106644	65734	41852	74096	91674	78208	112268	122952	113860	387370	496303
Nov	5321	46293	92563	68988	42990	65368	62278	61921	89546	163157	109002	341292	400228
Dez	9347	59401	95910	75236	51101	69387	81176	71979	117840	208747	124591	373233	466068
Total	155722	676676	1294863	869423	684968	997090	1084186	921678	1639779	1569737	1441352	4210590	5326421

ANEXO III – CARGA POLUENTE REMOVIDA ANUALMENTE (CBO)

CBO Removido (kg)													
	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Jan	1807	19856	8229	13810	11759	41729	18466	29390	30131	40618	40015	273793	155748
Fev	1478	14984	11151	9179	9147	42356	7964	17646	15959	41056	27248	183931	146574
Mar	1371	13359	11910	21043	3323	31192	10421	23303	17007	35262	52516	172793	170222
Abr	256	10022	11983	6042	1037	72425	16172	15154	5063	21411	42815	190647	96933
Mai	2766	13699	14207	13237	10676	54852	9681	10580	27753	99702	57007	245104	154537
Jun	864	9932	25842	2459	11231	111360	13367	27954	22644	100884	27141	334551	129296
Jul	1336	10539	21811	10321	23359	100559	14592	21592	34268	42814	51398	296755	110803
Ago	364	10606	22863	699	7229	74927	25565	32964	37817	78474	38822	192740	116023
Set	607	10804	21870	5356	4734	72287	14979	17379	45723	53685	61479	291637	120582
Out	2716	14364	23088	10846	8245	41938	18656	14468	40416	187625	35524	385476	176574
Nov	1314	17684	16083	14970	12080	41313	13639	17400	30446	88268	37824	290738	183204
Dez	1654	19196	17328	30245	8023	79448	17778	21018	32995	319592	54758	390427	204526
Total	16533	165045	206365	138208	110844	764386	181280	248849	340223	1109390	526548	3248593	1765021

ANEXO IV - CARGA POLUENTE REMOVIDA ANUALMENTE (CQO)

CQO Removido (kg)													
	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Jan	2911	37032	22080	39538	36476	19055	52937	78899	58666	69765	85728	490553	282816
Fev	2169	34577	29594	40409	35386	16604	16946	49854	35545	86458	66998	330877	243963
Mar	7871	30893	30410	45111	23463	30773	22345	57291	32556	80770	103898	323110	344473
Abr	747	19936	23604	32075	2446	28231	32421	34771	5842	34410	97330	366314	202784
Mai	4908	28914	33738	51451	47201	37341	20440	45626	46698	165828	173646	493172	317826
Jun	2916	20401	45775	10262	37843	17252	30065	71866	44749	276656	87276	722157	267790
Jul	1305	23045	44281	30773	185095	36171	33826	63651	58373	113173	133581	701410	275768
Ago	1240	24601	56358	15488	22868	34923	61444	131504	67217	119583	79919	318119	245423
Set	2468	26426	54411	52861	13434	41745	36304	58692	117965	72255	141291	514208	276972
Out	4014	30907	56095	28068	19461	21710	36326	49271	67810	246888	59378	646779	370352
Nov	1862	40286	31147	29458	17368	21277	27013	49475	54534	158018	64039	513644	365908
Dez	4459	38967	30915	75462	23813	27581	37639	72051	66108	495670	88896	735847	368260
Total	36871	355987	458408	450956	464853	332664	407705	762950	656064	1919474	1181979	6156189	3562335

ANEXO V - CARGA POLUENTE REMOVIDA ANUALMENTE (SST)

SST Removido (kg)													
	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Jan	1255	17930	12850	13621	12399	25688	23907	14364	49627	44666	39581	142986	104556
Fev	482	17114	13505	16561	13687	22088	6182	10168	18861	40427	31579	124894	122162
Mar	1857	16019	15535	5418	16615	38606	7158	16568	23567	22154	60243	102272	197205
Abr	315	9946	15843	12883	815	44356	11821	8032	9737	8130	61693	127906	101724
Mai	3705	11798	13765	22061	24603	78902	8689	13489	28960	35552	114136	163771	144827
Jun	1146	11099	21300	695	12719	32689	12673	6517	24801	31010	46616	345681	115930
Jul	879	8836	12147	15530	159956	50104	13668	13894	28359	12766	62334	327443	120072
Ago	482	8760	38082	2474	6147	41349	39155	76760	30498	74552	43900	87299	118438
Set	1041	11889	27565	12264	3075	43779	12909	13720	82301	40985	62138	126353	105353
Out	1317	11534	36774	6836	3348	12596	19297	8446	35926	52378	19356	134853	238997
Nov	772	15103	8940	14832	3783	15263	10115	8793	26864	131505	25452	106312	187907
Dez	2757	16513	6010	13166	7410	26714	10174	13028	35352	147375	47968	180769	198145
Total	16008	156540	222318	136342	264557	432134	175748	203780	394853	641497	614997	1970541	1755318

ANEXO VI – LAMAS DESIDRATADAS PRODUZIDAS ANUALMENTE

Lamas Produzidas (kg)													
	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Jan	n.d.	143720	56980	144820	30970	61680	122840	180560	124446	243160	255510	281980	430100
Fev	n.d.	118040	29260	85980	60690	30820	123000	121270	156562	187200	72570	285220	353480
Mar	n.d.	120520	0	117080	53500	0	125500	120080	169333	248580	123720	288800	484740
Abr	n.d.	186460	165260	114140	60680	68800	128620	152560	174512	124300	136470	257260	429780
Mai	n.d.	158000	102850	85500	52060	24020	160860	241030	437091	151560	191710	265280	430560
Jun	n.d.	153340	96820	86540	61320	49140	187340	149840	407202	177900	99680	287680	456320
Jul	n.d.	146360	127480	115540	128000	50800	247980	240890	491150	245090	72770	352180	423060
Ago	n.d.	177800	157360	121530	92390	49100	246500	292250	418475	204680	125120	375120	307580
Set	n.d.	129170	124600	86950	91120	49280	185320	183490	289307	122140	121260	310860	360160
Out	n.d.	185160	169600	148490	31020	24400	124200	120810	225098	91900	122380	330040	421240
Nov	n.d.	247120	124480	142130	30020	24480	208520	243280	233979	264980	96960	339420	384120
Dez	n.d.	91900	31900	62140	51780	0	176040	31060	189738	391770	152240	377840	470500
Total	n.d.	1857590	1186590	1310840	743550	432520	2036720	2077120	3316893	2453260	1570390	3751680	4951640

ANEXO VII – PRODUTOS DECORRENTES DO PROCESSO DE TRATAMENTO (ANUAIS)

Instalação	Consumos Energia (kWh/ano)	Volume anual afluyente (m ³ /ano)	CBO removido (kg/ano)	CQO removido (kg/ano)	SSTremovido (kg/ano)	Lamas (kg/ano)
ETAR A	195495	155722	16533	36871	16008	0
ETAR B	370558	676676	165045	355987	156540	1857590
ETAR C	793257	1294863	206365	458408	222318	1186590
ETAR D	453639	869423	138208	450956	136342	1310840
ETAR E	679460	684968	110844	464853	264557	743550
ETAR F	810615	997090	764386	332664	432134	432520
ETAR G	753884	1084186	181280	407705	175748	2036720
ETAR H	957139	921678	248849	762950	203780	2077120
ETAR I	519527	1639779	340223	656064	394853	3316893
ETAR J	1446073	1569737	1109390	1919474	641497	2453260
ETAR K	1249076	1441352	526548	1181979	614997	1570390
ETAR L	3250521	4210590	3248593	6156189	1970541	3751680
ETAR M	2973174	5326421	1765021	3562335	1755318	4951640

ANEXO VIII – CONSUMOS DE ENERGIA POR PERÍODO TARIFÁRIO

	HV	HSV	HP	HC
ETAR A	28.784	17.447	11.172	43.640
ETAR B	112.750	60.705	42.344	163.687
ETAR C	247.104	134.968	95.938	356.731
ETAR D	79.814	42.306	35.463	123.366
ETAR E	152.853	82.076	61.780	223.811
ETAR F	228.718	120.370	83.621	337.021
ETAR G	223.766	111.837	83.789	333.210
ETAR H	285.073	144.444	107.539	411.655
ETAR I	140.574	67.843	58.465	223.461
ETAR J	516.339	268.483	179.576	731.323
ETAR K	348.258	162.734	142.601	515.975
ETAR L	718.540	459.638	212.967	985.942
ETAR M	908.860	504.715	309.516	1.258.486

ANEXO IX – CONSUMOS DE ENERGIA ELÉTRICA POR SUBPROCESSO

		Consumos de energia elétrica anuais por subprocesso (kWh/ano)												
Processo	Sub-Processo	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
Tratamento Preliminar	Elevação Inicial		0	75.723	30.582	50.972	0	0	0	69.861	51.823	0	285.987	59.191
	Tamisação ou gradagem	548	5.006	4.887	659	0	3.843	3.271	0	0	6.859	0	0	0
	Desarenamento e Desengorduramento	7.341	32.859	33.025	55.726	17.048	0	6.888	83.593	0	62.321	161.883	27.469	0
	Tanque de Equalização	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	137.215	517.046
Tratamento Primário	Sedipac 3D	0	0	0	0	0	156.917	0	0	0	0	0	0	96.628
	Decantação Primária	0	0	0	0	0	0	38.702	0	0	0	0	11.006	0
Tratamento Secundário	Decantação Secundária	4.984	4.818	9.881	1.325	0	0	6.771	0	2.365	2.081	7.007	7.130	9.724
	BIOFOR (Engloba tudo do 2º)	0	0	0	0	0	467.323	0	0	0	0	0		0
	Arejamento	123.662	216.061	441.783	255.532	171.206	0	323.963	313.230	278.346	1.008.374	456.105	1.306.847	755.348
	Outros (p.ex. Selector, air lift)	0	0	0	2.199	0	0	0	0	0	0	0	0	66.576
Tratamento Terciário	U.V	0	0	0	17.514	14.106	7.499	0	1.932	0	2	7.696	0	0
	Microtamisação e filtração	0	0	25.287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.688
	Adição de reagentes	0	0	0	856	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tratamento de Lamas	Espessamento	0	7.008	2.182	0	40.715	0	58.617	68.527	3.708	1.963	0	42.011	24.893
	Desidratação	0	30.002	4.016	40.712	13.767	14.471	0	45.197	21.129	34.217	61.131	70.858	75.420
	Estabilização Ensilagem	0	3.079	797	700	1.868	0	0	3.592	0	7.017	0	0	54.521
	Recirculação de lamas, Nitrato e escorrências	31.784	38.936	138.198	17.220	5.161	8.337	99.715	16.588	110.778	84.543	44.350	182.895	492.787
Desodorização	Desodorização	0	0	0	6.657	73.891	35.809	0	86.680	32.631	389.775	225.089	520.139	369.234
Água de Serviço	Central Hidroressoradora	8.124	13.321	91.104	15.420	0	0	0	0	1.186	4.864	47.552	32.044	47.450

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

Consumos de energia elétrica anuais por subprocesso (kWh/ano)

Processo	Sub-Processo	ETAR A	ETAR B	ETAR C	ETAR D	ETAR E	ETAR F	ETAR G	ETAR H	ETAR I	ETAR J	ETAR K	ETAR L	ETAR M
	Elevação Final	0	0	0	0	0	0	0	36.798	0	0	0	0	0
Digestão Anaeróbia	Digestão Anaeróbia	0	0	0	0	0	52.181	0	0	0	0	0	51.208	0
Edifício de Exploração	Edifício, iluminação exterior	2.670	11.055	0	3.827	41.188	0	0	28.908	0	6.374	0	0	0

ANEXO X – Tabela t

Degrees of Freedom DF	Confidence Level				Degrees of Freedom DF	Confidence Level			
	95%	90%	80%	50%		95%	90%	80%	50%
1	12.71	6.31	3.08	1.00	16	2.12	1.75	1.34	0.69
2	4.30	2.92	1.89	0.82	17	2.11	1.74	1.33	0.69
3	3.18	2.35	1.64	0.76	18	2.10	1.73	1.33	0.69
4	2.78	2.13	1.53	0.74	19	2.09	1.73	1.33	0.69
5	2.57	2.02	1.48	0.73	21	2.08	1.72	1.32	0.69
6	2.45	1.94	1.44	0.72	23	2.07	1.71	1.32	0.69
7	2.36	1.89	1.41	0.71	25	2.06	1.71	1.32	0.68
8	2.31	1.86	1.40	0.71	27	2.05	1.70	1.31	0.68
9	2.26	1.83	1.38	0.70	31	2.04	1.70	1.31	0.68
10	2.23	1.81	1.37	0.70	35	2.03	1.69	1.31	0.68
11	2.20	1.80	1.36	0.70	41	2.02	1.68	1.30	0.68
12	2.18	1.78	1.36	0.70	49	2.01	1.68	1.30	0.68
13	2.16	1.77	1.35	0.69	60	2.00	1.67	1.30	0.68
14	2.14	1.76	1.35	0.69	120	1.98	1.66	1.29	0.68
15	2.13	1.75	1.34	0.69	∞	1.96	1.64	1.28	0.67

Note: Calculate DF using the following,

- $DF = n - 1$ (for a sample distribution)
- $DF = n - p - 1$ (for a regression model)

Where,

$n =$ sample size

$p =$ # regression model variables

ANEXO XI – Distância de Mahalanobis

A distância de Mahalanobis é calculada com o auxílio da média, variância e também da matriz de covariâncias do conjunto das variáveis independentes e é dada por:

$$D^2 = [x - m]^T \times C^{-1} \times [x - m] \quad (27)$$

Onde:

$D^2 =$ Distância de Mahalanobis

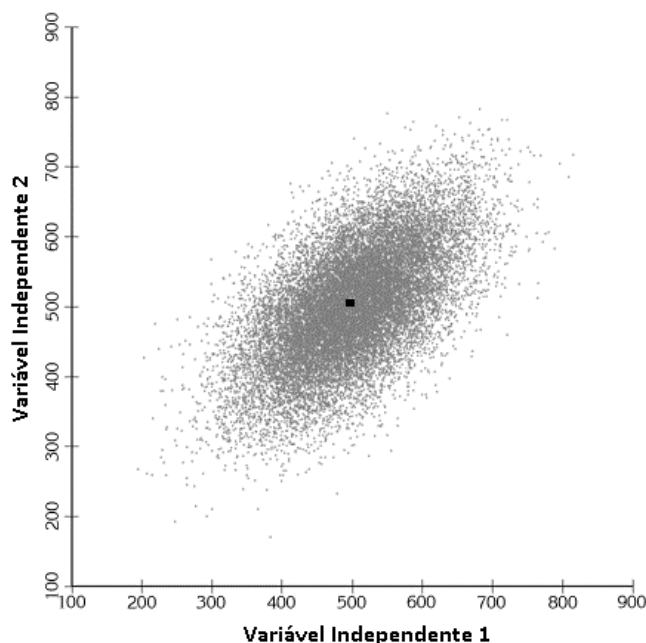
$x =$ Vetor de dados

$m =$ Média dos valores das variáveis independentes

$C^{-1} =$ Matriz inversa de variância/covariância das variáveis independentes

$T =$ Transposta da matriz

Dadas as séries de dados a utilizar (x e y), é possível determinar o valor médio ($\overline{m_1}$ e $\overline{m_2}$) de cada uma. Os dados médios de cada uma das variáveis utilizadas podem representar as coordenadas de um dado ponto ($\overline{m_1}, \overline{m_2}$), comumente designado por centróide. Cada uma das coordenadas que compõem o centróide são utilizadas no cálculo da matriz $[x-m]$ e por conseguinte no cálculo da sua matriz transposta. Na figura seguinte apresenta-se, a título exemplificativo, a representação dos pontos que utilizam como coordenadas cada uma das variáveis independentes utilizadas. (Jeness Enterprises, 2016)



Representação dos pontos coordenados - adaptado de (Jeness Enterprises, 2016)

As matrizes $[x-m]$ e a sua transposta, utilizadas na determinação da distância de Mahalanobis, são dada por:

$$[x - m] = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{m}_1 \\ y_1 - \bar{m}_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[x - m]^T = [x_1 - \bar{m}_1 \quad y_1 - \bar{m}_2] \quad (29)$$

Após determinação da matriz de variância/covariância é possível proceder ao cálculo da distância de Mahalanobis para cada um dos pontos de coordenadas. Contudo, por si só, a distância de Mahalanobis não permite avaliar se um dado ponto representa um resultado desviado dos restantes pontos que compõem a amostra. Para tal torna-se necessário utilizar uma distribuição Qui-quadrado de forma a avaliar quantitativamente a relação entre o resultado de uma dada experiência e a distribuição esperada para a mesma. De forma simplificada, o teste em causa permite aferir se a distribuição experimental de valores é consistente com a distribuição esperada para o fenómeno. Os outliers da amostra são obtidos através da comparação entre os valores observados na tabela de distribuição do Qui-Quadrado com o nível de significância definido na distância de Mahalanobis. São definidos como outliers os valores das variáveis cujo resultado da distribuição do Qui-Quadrado seja superior ao nível de significância definido.

ANEXO XII – Dados utilizados na definição do modelo global

Instalação	Consumos de energia (kWh/mês)	Volume tratado (m ³ /mês)	CBO Removido (kg/mês)	CQO Removido (kg/mês)	SST Removido (kg/mês)
ETAR A	15.691	4.430	607	2.468	1.041
ETAR A	15.708	25.099	1.807	2.911	1.255
ETAR A	15.854	44.221	1.371	7.871	1.857
ETAR A	15.964	5.879	864	2.916	1.146
ETAR A	16.207	9.347	1.654	4.459	2.757
ETAR A	16.266	16.065	1.478	2.169	482
ETAR A	16.277	4.189	364	1.240	482
ETAR A	16.287	5.021	1.336	1.305	879
ETAR A	16.562	9.144	2.716	4.014	1.317
ETAR A	16.631	5.321	1.314	1.862	772
ETAR A	16.848	19.669	256	747	315
ETAR A	17.201	7.337	2.766	4.908	3.705
ETAR B	26.282	61.180	14.984	34.577	17.114
ETAR B	27.757	48.925	10.804	26.426	11.889
ETAR B	28.664	65.550	10.022	19.936	9.946
ETAR B	28.801	67.735	19.856	37.032	17.930
ETAR D	29.030	88.851	6.042	32.075	12.883
ETAR B	30.841	67.735	13.359	30.893	16.019
ETAR B	30.844	50.736	9.932	20.401	11.099
ETAR B	30.993	43.047	10.606	24.601	8.760
ETAR B	31.607	59.401	19.196	38.967	16.513
ETAR D	32.418	50.058	5.356	52.861	12.264
ETAR B	33.366	62.093	14.364	30.907	11.534
ETAR B	33.635	46.293	17.684	40.286	15.103
ETAR B	33.879	57.413	13.699	28.914	11.798
ETAR B	33.891	46.568	10.539	23.045	8.836
ETAR D	34.084	53.778	699	15.488	2.474
ETAR I	34.224	194.749	5.063	5.842	9.737
ETAR D	36.024	47.784	10.321	30.773	15.530
ETAR D	36.137	65.734	10.846	28.068	6.836
ETAR D	36.847	74.784	13.237	51.451	22.061
ETAR D	38.050	53.446	2.459	10.262	695
ETAR D	39.192	75.236	30.245	75.462	13.166
ETAR G	39.619	91.414	7.964	16.946	6.182
ETAR I	39.645	145.081	15.959	35.545	18.861
ETAR I	39.739	120.667	27.753	46.698	28.960
ETAR D	40.013	103.075	21.043	45.111	5.418
ETAR I	40.553	177.239	30.131	58.666	49.627
ETAR I	41111	117840	32995	66108	35352
ETAR E	41.162	42.990	12.080	17.368	3.783
ETAR D	41.476	68.988	14.970	29.458	14.832

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

ETAR I	41522	89546	30446	54534	26864
ETAR D	41.621	93.100	9.179	40.409	16.561
ETAR I	41.851	242.958	17.007	32.556	23.567
ETAR I	42.629	107.830	22.644	44.749	24.801
ETAR E	43.030	51.101	8.023	23.813	7.410
ETAR I	46.811	91.446	45.723	117.965	82.301
ETAR I	47710	112268	40416	67810	35926
ETAR D	48.747	94.589	13.810	39.538	13.621
ETAR I	48.874	118.164	34.268	58.373	28.359
ETAR E	51.309	41.852	8.245	19.461	3.348
ETAR F	51.764	74.096	41.938	21.710	12.596
ETAR G	53.152	119.195	16.172	32.421	11.821
ETAR E	54.690	40.465	4.734	13.434	3.075
ETAR I	54858	121991	37817	67217	30498
ETAR G	55.826	62.278	13.639	27.013	10.115
ETAR G	56.480	81.176	17.778	37.639	10.174
ETAR E	57.207	39.134	11.231	37.843	12.719
ETAR F	57.330	69.387	79.448	27.581	26.714
ETAR G	57.870	68.417	9.681	20.440	8.689
ETAR C	58.568	151.927	8.229	22.080	12.850
ETAR E	59.278	66.766	9.147	35.386	13.687
ETAR H	59.326	71.979	21.018	72.051	13.028
ETAR C	60.167	155.930	11.910	30.410	15.535
ETAR E	60.390	74.107	1.037	2.446	815
ETAR C	60.477	150.900	11.983	23.604	15.843
ETAR C	60.905	130.800	11.151	29.594	13.505
ETAR E	61.691	49.178	7.229	22.868	6.147
ETAR G	62.085	70.307	13.367	30.065	12.673
ETAR E	62.208	54.192	10.676	47.201	24.603
ETAR C	62.615	84.107	25.842	45.775	21.300
ETAR E	63.568	79.991	11.759	36.476	12.399
ETAR F	64.566	75.643	42.356	16.604	22.088
ETAR G	64.859	91.674	18.656	36.326	19.297
ETAR F	65.439	65.368	41.313	21.277	15.263
ETAR G	66.246	148.346	10.421	22.345	7.158
ETAR E	66.480	100.698	3.323	23.463	16.615
ETAR C	66.959	74.136	21.811	44.281	12.147
ETAR C	67.298	78.458	21.870	54.411	27.565
ETAR F	67.563	104.367	72.425	28.231	44.356
ETAR F	68.184	71.359	72.287	41.745	43.779
ETAR C	68.215	69.599	22.863	56.358	38.082
ETAR G	69.369	115.773	18.466	52.937	23.907
ETAR H	70.377	78.836	29.390	78.899	14.364
ETAR H	71.161	65.597	17.646	49.854	10.168
ETAR C	71.335	92.563	16.083	31.147	8.940

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

ETAR F	71.458	84.387	54.852	37.341	78.902
ETAR F	71.613	80.402	41.729	19.055	25.688
ETAR G	71.634	75.462	14.592	33.826	13.668
ETAR C	71.720	103.889	14.207	33.738	13.765
ETAR C	72.170	95.910	17.328	30.915	6.010
ETAR C	72.829	106.644	23.088	56.095	36.774
ETAR H	73.197	72.856	15.154	34.771	8.032
ETAR F	75.399	111.901	31.192	30.773	38.606
ETAR H	76.415	77.420	23.303	57.291	16.568
ETAR G	77.144	68.240	14.979	36.304	12.909
ETAR F	77.347	99.637	74.927	34.923	41.349
ETAR H	79.253	61.921	17.400	49.475	8.793
ETAR H	79.384	66.124	10.580	45.626	13.489
ETAR G	79.600	91.904	25.565	61.444	39.155
ETAR H	80.494	60.903	27.954	71.866	6.517
ETAR K	83.230	113.860	35.524	59.378	19.356
ETAR J	84.408	134.942	40.618	69.765	44.666
ETAR K	84.497	101.284	61.479	141.291	62.138
ETAR J	84643	125940	41056	86458	40427
ETAR J	85.699	184.618	35.262	80.770	22.154
ETAR J	88.268	80.491	21.411	34.410	8.130
ETAR H	88.976	78.208	14.468	49.271	8.446
ETAR H	88.989	93.880	21.592	63.651	13.894
ETAR H	89.359	76.224	17.379	58.692	13.720
ETAR K	90.856	105.783	38.822	79.919	43.900
ETAR K	94023	109002	37824	64039	25452
ETAR K	96.144	109.358	51.398	133.581	62.334
ETAR K	97055	123884	40015	85728	39581
ETAR H	100.209	117.730	32.964	131.504	76.760
ETAR K	101.273	108.148	27.248	66.998	31.579
ETAR K	111.385	103.592	27.141	87.276	46.616
ETAR K	118.757	122.071	57.007	173.646	114.136
ETAR J	118.989	101.197	53.685	72.255	40.985
ETAR K	120.679	124.591	54.758	88.896	47.968
ETAR K	125.289	145.161	42.815	97.330	61.693
ETAR K	125.890	174.618	52.516	103.898	60.243
ETAR J	126.000	88.123	78.474	119.583	74.552
ETAR J	131.421	158.007	99.702	165.828	35.552
ETAR J	142.734	98.198	42.814	113.173	12.766
ETAR J	149.801	163.157	88.268	158.018	131.505
ETAR J	151.533	122.952	187.625	246.888	52.378
ETAR M	236.427	413.759	146.574	243.963	122.162
ETAR M	240.575	374.494	110.803	275.768	120.072
ETAR M	240.898	383.241	129.296	267.790	115.930
ETAR L	240.994	339.386	183.931	330.877	124.894

Avaliação das Condições de Uso e Consumo de Energia em Estações de Tratamento de Águas Residuais

ETAR M	242.013	400.228	183.204	365.908	187.907
ETAR M	242.223	373.446	120.582	276.972	105.353
ETAR M	246.708	344.964	116.023	245.423	118.438
ETAR M	248.585	430.464	154.537	317.826	144.827
ETAR M	256.230	466.068	204.526	368.260	198.145
ETAR M	263.998	514.210	155.748	282.816	104.556
ETAR L	265.322	375.061	190.647	366.314	127.906
ETAR L	265.670	404.487	273.793	490.553	142.986
ETAR L	273.311	450.821	172.793	323.110	102.272
ETAR L	275.710	329.391	245.104	493.172	163.771
ETAR L	279.537	310.111	291.637	514.208	126.353
ETAR L	282.275	273.952	192.740	318.119	87.299