



Daniela Alexandra Frota da Silva

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

**Análise dos consumos energéticos nas ETAR.
Casos de estudo: ETAR do Seixal e Sesimbra.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente – Perfil Engenharia de Sistemas
Ambientais

Orientador: Prof. Doutora Maria Júlia Fonseca de Seixas, Professora Auxiliar,
FCT/UNL;

Co-orientador: Prof. Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral,
Professora Auxiliar, FCT/UNL.

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho, Professor, FCT/UNL;
Arguente: Doutor Francisco Manuel Freire Cardoso Ferreira, Professor Auxiliar, FCT/UNL;
Vogal: Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral, Professora Auxiliar, FCT/UNL.

Análise dos consumos energéticos nas ETAR. Casos de estudo: ETAR do Seixal e Sesimbra.

Copyright © Daniela Alexandra Frota da Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.

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

Agradecimentos

Esta dissertação representa o culminar do meu percurso académico na Faculdade de Ciências e Tecnologia e assim sendo pretendo dirigir os meus agradecimentos a todos os que de forma direta ou indireta contribuíram para sua realização.

Em primeiro lugar devo agradecer à minha família, sobretudo aos meus pais e irmã, por todo o sacrifício e apoio incondicional, espero ter feito jus às vossas expectativas e que assim perdure.

À DISPAR e à Prof.^a Doutora Graça Martinho, Prof. Doutor Pedro Coelho e Prof.^a Doutora Leonor Amaral agradeço a confiança que depositaram em mim ao possibilitarem-me continuar os meus estudos através da atribuição de uma bolsa de estudo.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Júlia Seixas, pela motivação sobre o tema, disponibilidade para o acompanhamento constante do trabalho, sugestões fornecidas e ainda pela ajuda na organização e revisão do trabalho.

À minha co-orientadora, Professora Doutora Leonor Amaral, pela partilha de conhecimentos, espírito crítico sobretudo na reta final, pela revisão do documento e contacto com as entidades necessárias ao desenvolvimento do trabalho.

Ao Engenheiro José Pacheco e à Engenheira Lisete Epifâneo, da AdLVT, pela disponibilização de dados sobre as ETAR do Seixal e de Sesimbra, nomeadamente pelo fornecimento de um trabalho de fim de curso, até à data não publicado, da autoria de Pedro Marques. Estes dados foram imprescindíveis para a elaboração desta dissertação.

Ao Engenheiro Luís Dias do CENSE pelos dados fornecidos acerca dos custos de implementação dos painéis solares fotovoltaicos que foram essenciais para o desenvolvimento da dissertação.

Aos meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo destes anos, pela amizade, por todas as experiências partilhadas e pela compreensão sobretudo nas etapas mais complicadas ao longo deste percurso.

Por último, mas tão ou mais importante, agradeço ao meu namorado João Cruz pelo enorme apoio, constante motivação e compreensão.

A todos os meus sinceros agradecimentos!

Resumo

As estações de tratamento de águas residuais (ETAR) representam um elevado gasto de energia, sobretudo em forma de eletricidade, tendo em conta que dispõem de equipamentos que operam 24h por dia. Prevê-se que o consumo energético nestas estações tenda a aumentar pelo que é relevante assumir uma gestão eficiente dos consumos energéticos aliada à aplicação medidas de eficiência energética e à aposta em energias renováveis.

Este documento visa alcançar uma maior compreensão dos consumos energéticos nas ETAR, avaliar o desempenho energético das mesmas através de um sistema de indicadores de desempenho energético (IDE) e ainda a viabilidade financeira da implementação de dois tipos de sistema de painéis solares fotovoltaicos (PV): sistema de painéis fixos (sistema A) e sistema de painéis com sistema *tracking* de um eixo (sistema B). Esta análise teve por base três cenários: situação de referência, análise dos consumos de eletricidade das ETAR e cenário de produção energética. Como casos de estudo selecionaram-se as ETAR do Seixal e de Sesimbra.

No que diz respeito ao consumo energético por quantidade de carga orgânica no afluente (kWh/kg CBO₅), comprova-se que a ETAR do Seixal e de Sesimbra apresentam um desempenho energético bom e aceitável, respetivamente. Por outro lado, no que diz respeito à produção energética por cogeração e ao consumo de energia elétrica por fontes externas comprova-se a existência de oportunidades de melhoria. Constatou-se que ambas as ETAR se encontram sobredimensionadas e que os maiores consumos são advindos do tratamento secundário.

Relativamente ao potencial de produção de energia solar PV, em termos de balanço poder-se-iam atingir com reduções na aquisição de energia elétrica proveniente da rede entre 22% e 31% nas ETAR do Seixal e entre 19% e 26% em Sesimbra, para o sistema A e B, respetivamente. Todos os investimentos se revelam financeiramente viáveis, dado que conseguem gerar uma taxa de rendibilidade superior ao custo de oportunidade do capital e que os tempos de recuperação do capital são inferiores ao tempo médio de vida útil do sistema. Em ambas as situações o sistema B revelou-se a solução mais custo-eficaz.

As operações e processos de uma ETAR apresentam uma elevada complexidade, pelo que cada ETAR consiste um caso isolado. Estas estações podem não só transformar os seus processos e operações de forma a diminuir os seus consumos energéticos, bem como tornar-se locais de produção de energia. Foi ainda possível constatar que os seus consumos podem não só dever-se aos consumos próprios das ETAR, mas também a outros fatores externos e não necessariamente a uma incorreta gestão da empresa.

Palavras-chave: eficiência energética, energia solar fotovoltaica, balanço neutro de energia, ETAR, indicadores de desempenho energético.

Abstract

Wastewater treatment plants (WWTP) consumes a large amount of energy, especially in the form of electricity, considering that they have equipment that operates 24 hours a day. The energy consumption in these stations tends to increase for what is relevant to assume an efficient management of the energy consumptions allied to the application of energy efficiency measures and the bet on renewable energies.

This paper aims to achieve a better understanding of the energy consumptions in the WWTP, to evaluate their energy performance through a system of energy performance indicators (EPI) and also to analyze the financial feasibility of implementing two types of photovoltaic systems (PV) : fixed panels (system A) and panels with one-track tracking system (system B). This analysis was based on three scenarios: reference situation, analysis of the electricity consumptions of the WWTP and energy production scenario. As case studies were selected: Seixal WWTP and Sesimbra WWTP.

The energy consumption per quantity of organic load in the influent (kWh/kg BOD₅) proves that Seixal WWTP and Sesimbra WWTP and have a good and acceptable energy performance, respectively. On the other hand, the energy cogeneration production and electricity consumption from external sources proves the existence of opportunities for improvement. Both WWTP revealed to be oversized and that the highest consumption is due to the secondary treatment.

In terms of balance, the energy production systems could achieve reductions in annual consumption between 22% and 31% in the Seixal WWTP and between 19% and 26% in Sesimbra, for system A and B, respectively. All investments prove to be financially viable as they manage to generate a rate of return that is higher than the opportunity cost of capital, and that the times of capital recovery are lower than the average life of the system. In both situations the system B proved to be the most cost-effective solution.

The operations and processes of a WWTP are highly complex, so each WWTP is a particular case. These stations can not only transform their processes and operations in order to reduce their energy consumption as well as become energy production sites. It was also possible to verify that its consumption can not only be due to the own consumption of the WWTP, but also to other external factors and not necessarily to an incorrect management of the company.

Keywords: energy self-sufficiency, solar photovoltaic energy, wastewater treatment plant, performance indicators

Índice geral

1. Preâmbulo	1
2. Introdução	3
2.1. Enquadramento e relevância do tema	3
2.2. Âmbito e objetivo	6
3. Águas Residuais	9
3.1. Caracterização e legislação.....	9
3.2. Fases de tratamento.....	10
3.2.1. Fase líquida.....	11
3.2.2. Fase sólida.....	13
3.2.3. Fase gasosa.....	14
4. Consumos energéticos das ETAR	15
4.1. Estudos de <i>benchmarking</i>	18
4.2. Eficiência energética nas ETAR	21
4.3. Oportunidades de produção e recuperação de energia em ETAR.....	23
4.3.1. Produção de biogás na digestão anaeróbia.....	26
4.3.2. Aproveitamento de energia solar	28
4.4. Exemplos de ETAR energeticamente eficientes	32
5. Métodos e materiais utilizados para a avaliação dos consumos energéticos nas ETAR e do seu potencial de redução	37
5.1. Casos de estudo.....	37
5.1.1. ETAR do Seixal.....	38
5.1.2. ETAR de Sesimbra	39
5.2. Metodologia para avaliação do potencial de redução do consumo de eletricidade das ETAR	41
5.2.1. Situação de Referência.....	42
5.2.2. Análise dos consumos de eletricidade nas ETAR	48
5.2.3. Cenário de produção energética.....	50
6. Apresentação e discussão de resultados	57
6.1. ETAR do Seixal	57

6.1.1. Situação de Referência.....	57
6.1.1. Análise dos consumos de eletricidade.....	61
6.1.2. Cenário de produção energética.....	63
6.2. ETAR de Sesimbra.....	65
6.2.1. Situação de Referência.....	65
6.2.2. Análise dos consumos de eletricidade.....	Erro! Marcador não definido.
6.2.3. Cenário de Produção/Recuperação energética.....	69
7. Conclusões e recomendações para estudos futuros	73
7.1. Conclusões.....	73
7.2. Limitações.....	76
7.3. Recomendações para estudos futuros.....	76
Referências bibliográficas.....	78
ANEXOS.....	88
Anexo A – Consumos energéticos das ETAR.....	89
Anexo B – Dados de operação das ETAR.....	93

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Produção de eletricidade em Portugal de 1995 a 2014 com base no tipo de fonte	4
Figura 4.1 – Variação típica diária da afluência de água residual	15
Figura 4.2 – Exemplo de perfil de consumo de energia elétrica e energia elétrica produzida por sistema PV.....	25
Figura 4.3 – Representação esquemática do sistema de tratamento da ETAR de Strass im Zillertal	34
Figura 5.1 – Fluxograma metodológico da dissertação.	41
Figura 5.2 – Processo de seleção dos IDE a utilizar.	43
Figura 5.3 – Distribuição dos consumos elétricos na ETAR de Strass im Zillertal.....	49
Figura 5.4 – Irradiação solar horária nos diversos meses do ano.....	52
Figura 6.1 – Consumo de eletricidade de janeiro de 2013 a dezembro de 2015 distribuídos pelos períodos horários	57
Figura 6.2 – Volume mensal de água tratada em 2013 e 2014 e caudais médios diários de dimensionamento.....	59
Figura 6.3 – Relação entre o consumo de eletricidade e i) valores de efluente em 2013(a) e em 2014(b), ii) carga orgânica em 2013(c) e 2014(d); iii) PE em 2013(e) e 2014(f), na ETAR do Seixal.....	60
Figura 6.4 – Áreas disponíveis para implementação de painéis solares PV na ETAR do Seixal.	63
Figura 6.5 – Produção de eletricidade pelos sistemas A e B face ao cenário global na ETAR do Seixal.	64
Figura 6.6 – Volume de água residual tratada nos anos de 2013 e 2014 e caudais médios mensais de dimensionamento.	67
Figura 6.7 – Áreas disponíveis para implementação de painéis solares PV na ETAR de Sesimbra.....	69
Figura 6.8 – Produção de eletricidade pelos sistemas A e B face ao cenário global na ETAR de Sesimbra.....	69

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Requisitos para as descargas das estações de tratamento de águas residuais urbanas.	9
Tabela 3.2 – Objetivos das fases e respetivas etapas de tratamento nas ETAR.....	10
Tabela 4.1 – Consumos energéticos das principais etapas de tratamento em ETAR	16
Tabela 4.2 – Consumos elétricos específicos médios de acordo com os tipos de tratamento dos efluentes.	19
Tabela 4.3 – Consumo energético por volume de água residual tratada em várias ETAR no mundo	20
Tabela 4.4 – Medidas e estratégias de eficiência energética aplicadas em ETAR	22
Tabela 4.5 – Características específicas de algumas das tecnologias aplicadas para aproveitamento solar.....	30
Tabela 5.1 – Proposta de IDE para avaliação da Situação de Referência.....	43
Tabela 5.2 – Valores de referência ou Valor-alvo de alguns indicadores de desempenho energético selecionados.	46
Tabela 5.3 – Tarifa tetra-horária em ciclo diário.	48
Tabela 5.4 – Condições de referência dos locais de implementação do projeto obtidos pelo PVGIS.	51
Tabela 5.5 – Requisitos de área necessária por dimensão do projeto fotovoltaico com um sistema PV	52
Tabela 5.6 – Critérios de seleção com base no VAL.....	55
Tabela 6.1 – Dados do volume afluente médio diário, dos sistemas de recuperação/produção energética implementados e consumos da ETAR do Seixal.	57
Tabela 6.2 – Indicadores para a ETAR do Seixal em 2013 e 2014.....	58
Tabela 6.3 – Requisitos legais de descarga de efluentes na Áustria e em Portugal.....	61
Tabela 6.4 – Características dos efluentes austríacos e os da ETAR do Seixal.....	62
Tabela 6.5 – IDE referentes às ETAR do Seixal e Strass im Zillertal.	62
Tabela 6.6 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema A.....	63
Tabela 6.7 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema B.....	63
Tabela 6.8 – Resultados da implementação do projeto.....	65
Tabela 6.9 – IDE pós-implementação do sistema solar PV na ETAR do Seixal.	65

Tabela 6.10 – Dados do volume afluente médio diário, dos sistemas de recuperação/produção energética implementados e consumos da ETAR do Sesimbra.	66
Tabela 6.11 – Indicadores para a ETAR de Sesimbra em 2013 e 2014.	66
Tabela 6.12 – Características dos efluentes austríacos e os da ETAR de Sesimbra	68
Tabela 6.13 – IDE referentes às ETAR de Sesimbra e Strass im Zillertal.	68
Tabela 6.14 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema A.....	70
Tabela 6.15 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema B.....	70
Tabela 6.16 – Resultados obtidos pela implementação do projeto e indicadores financeiros calculados.	71
Tabela 6.17 – IDE pós-implementação do sistema solar PV na ETAR de Sesimbra.....	71

Acrónimos

ETAR – Estação/Estações de tratamento de águas residuais

CBO – Carência Bioquímica de Oxigénio

CBO₅ – Carência Bioquímica de Oxigénio a 5 dias

CQO – Carência Química de Oxigénio

GEE – Gases com Efeito de Estufa

SSB – ETAR de Sesimbra

SXL – ETAR do Seixal

FER – Fontes de Energia Renováveis

PV – Fotovoltaico

DA – Digestão anaeróbia

Wp – Watt-pico

PE – População equivalente

VAL – Valor atualizado líquido

TIR – Taxa interna de rendibilidade

TRC – Tempo de retorno do capital

1. Preâmbulo

O presente estudo foi desenvolvido somente com dados disponibilizados inicialmente de relatórios existentes e sem posterior consulta à empresa para análise e validação dos dados por parte das entidades responsáveis pelas ETAR analisadas.

2. Introdução

2.1. Enquadramento e relevância do tema

Água e energia são recursos imprescindíveis para o bem-estar humano e para um desenvolvimento socioeconómico sustentável. A água constitui um recurso natural renovável, único e insubstituível e a energia existe em variadas formas, que por sua vez podem ser derivadas de uma variedade de fontes (WWDR, 2014). Estes recursos estão fortemente ligados, sendo que esta relação poderá ser vista de duas formas distintas: “água para energia” e “energia para água” (Perrone *et al.*, 2011). A primeira diz respeito ao volume de água necessário para produzir, transportar e usar todas as formas de energia até certo ponto e a segunda corresponde à energia necessária para a extração, tratamento e distribuição da água para consumo, bem como para recolha e tratamento das águas residuais (Perrone *et al.*, 2011; WWDR, 2014).

As ligações e interdependência entre estes recursos, juntamente com as respetivas externalidades positivas e negativas são o que se denomina por “*nexus* água-energia” (WWDR, 2014). Desta forma, revela-se importante estudar esta interação (Gu *et al.*, 2016), analisando as relações de dependência e sinergias estabelecidas entre estes recursos no sentido de serem identificadas as estratégias de gestão mais adequadas ao uso eficiente de ambos os recursos.

O contínuo crescimento populacional causado pelo desenvolvimento das sociedades acarreta preocupações face à preservação destes recursos. Assim, em virtude deste aumento e de outros aspetos como economias em crescimento, mudanças nos estilos de vida e evolução dos padrões de consumo, estima-se que nas próximas décadas aumente a procura por água, energia, alimentos e outros bens e serviços que necessitem de água para o processo de produção ou distribuição, assim como de água para consumo, saúde e saneamento (WWDR, 2014).

O consumo de energia tem particular relevância dado que Portugal é um país com uma elevada dependência energética devido à inexistência de produção nacional por fontes de energia fósseis, as quais representam um peso entre 60 a 70% no *mix* de produção energética. Porém, nos últimos anos, a aposta em energias renováveis e na eficiência energética tem contribuído para a redução desta dependência possibilitando alcançar níveis inferiores a 80% (DGEG, 2015).

De acordo com a Figura 2.1 verifica-se um aumento contínuo do peso da produção baseada em fontes de energia renováveis (FER) no *mix* de produção de energia elétrica, sendo que de todas estas fontes os aproveitamentos eólicos e hídricos representam a maior parcela na produção de eletricidade na última década. Factores como a variabilidade do regime hidrológico influenciam a dependência energética, sendo que nos anos secos são originadas produtividades inferiores nas centrais hídricas. Este fenómeno foi evidenciado em 2005 e novamente em 2008 (DGEG, 2015).

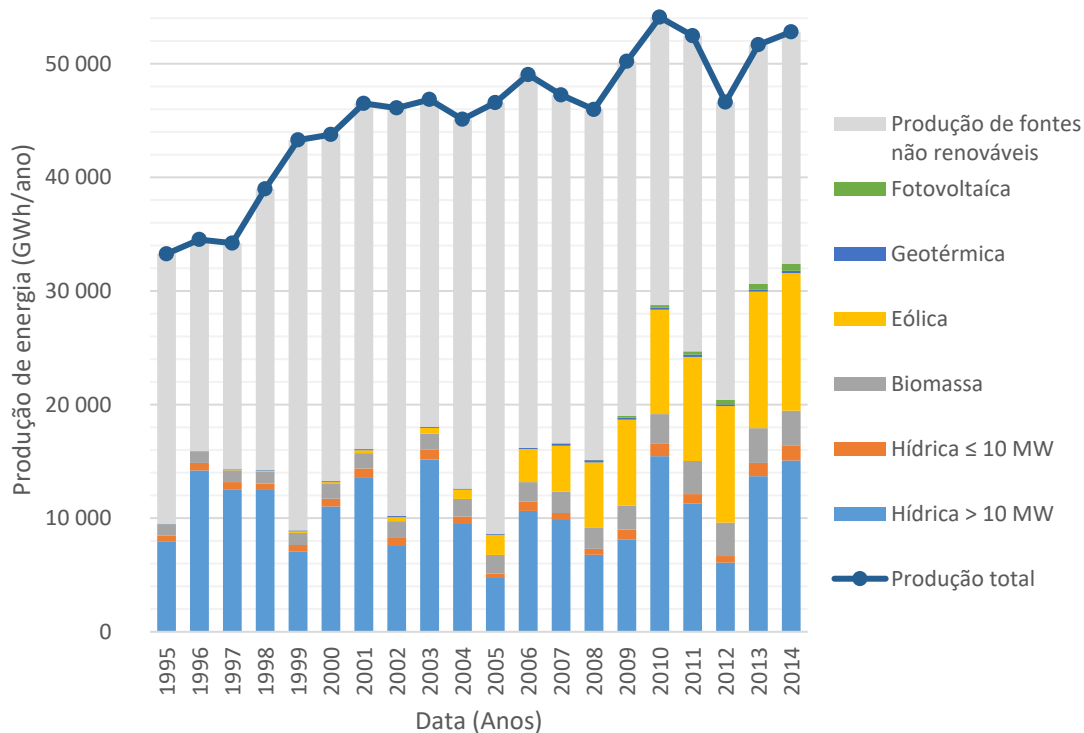


Figura 2.1 - Produção de eletricidade em Portugal de 1995 a 2014 com base no tipo de fonte (Adaptado de: DGEG, 2015)

De forma geral, a energia solar fotovoltaica destaca-se por ter sido a que recentemente registou um maior aumento de potência instalada, estimada na ordem dos 10% (PrimeEnergy Solar Systems, 2016). Porém, apesar deste crescimento, a energia solar continua a ser uma fonte residual no volume global de eletricidade gerado em Portugal, constituindo cerca de 2% desta produção, estando assim aquém das suas potencialidades (DGEG, 2015).

Em 2014, com recurso às tecnologias de produção de energia elétrica por fonte renovável alcançou-se uma poupança de 1 500 milhões de euros na importação de combustíveis fósseis e a consequentemente emissão de 13 milhões de toneladas de CO₂ (Quercus & APREN, 2015). Em 2015 alcançou-se uma poupança de 1 099 milhões de euros na importação de combustíveis fósseis e evitou-se a emissão de 9 milhões de toneladas de CO₂ (PrimeEnergy Solar Systems, 2016). Já em 2016, foi possível comprovar o potencial de produção de eletricidade por meio de FER em Portugal, alcançando-se quatro dias contínuos sustentados apenas por energias renováveis, nomeadamente solar, eólica e hídrica (ZERO, 2016a).

A aposta nas energias renováveis para produção de eletricidade auxiliam o cumprimento das diretrizes europeias da política energética e ambiental englobadas no Pacote Europeu Energia/Clima “20–20–20”, as quais visam simultaneamente uma redução da dependência energética do país e ainda garantir a segurança de abastecimento, pela promoção de um *mix energético* equilibrado (UE, 2015). Neste sentido, para que a quota de energias renováveis a nível comunitário atinga 20%, Portugal terá de alcançar os 31% a nível nacional. Contudo, segundo o relatório do projeto *Keep on Track* de 2015, Portugal não deverá alcançar esta meta

dado que apresenta uma dependência energética perto de 70%, estando longe de atingir um estado de autossuficiência energética. Revela-se essencial estabelecer metas mais ambiciosas e sejam efetuados investimentos em energias renováveis (ZERO, 2016b; Eufores *et al.*, 2015).

Estações de tratamento de águas residuais (ETAR) são um caso típico interação água-energia, nas quais o tratamento das águas residuais resultantes da atividade humana é assegurado com recurso a energia (Gu *et al.*, 2016). A necessidade de remoção de contaminantes biológicos, químicos e físicos previamente à sua descarga nos corpos de água recetores como rios, lagos e oceanos, requer uma quantidade de energia elevada (Gude, 2015a; Means, 2004). A quantidade de energia consumida sob a forma de eletricidade equivale a aproximadamente 7% do total de eletricidade consumida a nível mundial (Plappally *et al.*, 2011) e constitui cerca de 5 a 30% dos custos totais de operação das ETAR (Liu *et al.*, 2012).

Assim sendo, alcançar um elevado nível de eficiência energética incidindo numa redução dos consumos energéticos, da emissão de GEE e dos custos de operação tem-se revelado cada vez mais um tópico relevante na gestão das ETAR (Saghafi *et al.*, 2015). Neste sentido vários países têm apostado na elaboração de processos de *benchmarking* no setor das águas residuais, como a Áustria, assim como a elaboração de manuais de eficiência energética, sendo alguns exemplos o Manual Suíço de Energia para ETAR (BUWAL) e o Manual Alemão otimização da energia (MURL) (Wett *et al.*, 2007).

Prevê-se que o consumo energético nestas estações tenda a aumentar não só devido aos factores referidos acima, como pelo envelhecimento dos equipamentos e pela necessidade de implementar novas tecnologias que permitam não só salvaguardar a qualidade do efluente, assim como ir de encontro a padrões de qualidade mais exigentes de forma a tornarem-se eficazes na remoção de produtos cuja descarga, atualmente ainda não se encontra regulamentada (NEWRI *et al.*, sem data, Panepinto *et al.*, 2016; Tchobanouglos *et al.*, 2014; EPRI, 2002; Frijins *et al.*, 2013).

Este aumento implica um acréscimo nos custos associados ao setor e dada a crise financeira que se instalou nos últimos anos em vários países, o uso de ferramentas e metodologias para minimizar estes gastos tem despertado um interesse crescente no setor das águas residuais (Molinos-Senante *et al.*, 2013). Assim, maximizar os ganhos energéticos das fontes de recuperação e produção energética, pode permitir que, sobretudo as ETAR de maiores dimensões, alcancem um balanço neutro de energia e por vezes até consigam vender o excedente à rede (Lazarova *et al.*, 2012).

Assim sendo, o principal desafio reside na capacidade de alcançar uma melhor eficiência energética nas ETAR e em simultâneo que a própria eficiência do tratamento seja igualmente garantida ou melhorada. Desta forma é possível alcançar não só uma melhoria da qualidade da água como também uma melhoria da qualidade do ar pela minimização das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) (Lazarova *et al.*, 2012).

Existem cada vez mais opções disponíveis que visam transformar as ETAR de consumidores de energia para produtores, aproveitando desta forma a energia contida nas águas residuais (Gude, 2015a), dado que esta poderá conter dez vezes mais energia do que a requerida para o seu tratamento (Gude, 2015b). As opções dizem respeito tanto à minimização dos consumos energéticos pela adoção de medidas de eficiência energética, como à recuperação e aproveitamento energético com base em energias renováveis para produção de eletricidade, como por exemplo a energia solar.

Posto isto e tendo em conta que a situação energética nacional assenta num subaproveitamento das energias endógenas (GREENPRO, 2004) revela-se necessário atuar nos dois pilares da descarbonização do sistema energético nacional: eficiência energética e o recurso a FER. Neste contexto, revela-se essencial um acompanhamento dos consumos de energia elétrica, não só pelo valor financeiro que representam nos custos totais da ETAR, como também pelo impacto que têm, quer através do consumo de recursos naturais, quer pelas conseqüentes emissões associadas ao processo de produção da eletricidade por fontes não renováveis. Somente com este conhecimento é possível elaborar uma gestão eficiente dos consumos e em última instância alcançar um balanço neutro de energia nas ETAR.

2.2. Âmbito e objetivo

Dado que a energia é imprescindível para o desenvolvimento de um país, para assegurar a sua utilização contínua revela-se fundamental apostar na sustentabilidade energética apoiada numa gestão racional dos recursos disponíveis. Este facto é também suportado por Portugal ser um país com uma elevada dependência energética devido à inexistência de produção nacional por fontes não renováveis, que asseguram a maior parte das necessidades energéticas nacionais. Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo geral servir de contributo no sentido da prossecução dos compromissos de desenvolvimento sustentável do país.

Paralelamente, pretende-se com a presente dissertação atingir os seguintes objetivos específicos: i) alcançar uma maior compreensão dos consumos energéticos nas ETAR; ii) analisar e avaliar o desempenho energético atual de duas ETAR nacionais; iii) analisar uma ETAR com um balanço neutro de energia; iv) estimar a autossuficiência energética alcançada pela implementação de sistemas de energia solar fotovoltaica para substituição de parte da energia proveniente da rede.

O estudo foi efetuado por meio de casos de estudo reais: as ETAR do Seixal e de Sesimbra, possuindo um âmbito geográfico local no distrito de Setúbal. A seleção dos casos de estudo teve em consideração, entre outros critérios, o tipo de sistema de tratamento de águas residuais tendo sido selecionada uma que opera num sistema de lamas ativadas, o mais comum em Portugal, e outra por biofiltros. Os consumos energéticos analisados dizem respeito à energia elétrica, tendo em conta que diz respeito a cerca de 90% do consumo energético total das ETAR (Mizuta & Shimada, 2010). A análise incide somente no processo de tratamento de águas residuais, não

incluindo os consumos das instalações de apoio, dado que estas possuem consumos energéticos muito inferiores por comparação aos primeiros.

Para o desenvolvimento da presente dissertação, mais concretamente os cálculos efetuados, recorreu-se a informação e dados de base apresentados em estudos prévios sobre as ETAR analisadas, tendo sido estas informações compiladas, tratadas e, por fim, avaliadas. O estudo teve por base a análise dos dois anos consecutivos mais recentes com informações disponíveis (2013 e 2014) acerca dos consumos energéticos, de forma a apurar se se tratam de padrões de consumo normais ou se existiram consumos anómalos e averiguar a existência de padrões de sazonalidade.

Estruturalmente a presente dissertação divide-se em 7 capítulos, sendo iniciada pelo Capítulo 1, o Preambulo, seguindo-se do Capítulo 2, a Introdução, onde se procede à explicitação do enquadramento e relevância do assunto em estudo, dos objetivos e âmbito da dissertação e da sua organização geral. No Capítulo 3, são sintetizados conhecimentos sobre as características e modo de funcionamento das ETAR. O Capítulo 4 incide nos consumos energéticos em ETAR e no conceito de ETAR energeticamente neutra. Aborda ainda a legislação referente a unidades de produção para autoconsumo e unidades de pequena produção.

Seguidamente o Capítulo 5 diz respeito à metodologia utilizada para a avaliação dos consumos energéticos das ETAR e do seu potencial de redução e ainda os casos de estudo selecionados. No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada ETAR analisada. Por fim, no Capítulo 7, são sistematizadas as conclusões obtidas, indicadas as limitações do estudo e sugeridas recomendações para estudos futuros. Em seguida são apresentados os anexos considerados pertinentes à compreensão do trabalho desenvolvido na presente dissertação.

3. Águas Residuais

Este capítulo visa explicitar o processo de tratamento de águas residuais, sendo primeiramente apresentados os tipos de águas residuais existentes e os parâmetros legais de descarga e em seguida apresentadas de forma sucinta as várias etapas de tratamento comumente encontradas em ETAR, assim como as suas respetivas operações e processos unitários.

3.1. Caracterização e legislação

As vantagens associadas ao funcionamento das ETAR são evidentes, no sentido que permitem a melhoria da qualidade da água a ser descarregada no meio recetor, além dos benefícios a nível ambiental e aos associados à saúde pública (Simões *et al.*, 2008). O tratamento deve conduzir à obtenção de um efluente final de elevada qualidade, permitindo a sua reutilização ou descarga no meio recetor, o que possibilita a preservação dos recursos hídricos e defesa da saúde pública.

As ETAR recebem e tratam águas residuais com diferentes composições, o que implica diferentes tipos de operações e processos unitários. Com base nas suas características e de acordo com as definições dos respetivos diplomas legais, nomeadamente o Decreto-lei nº 236/98, de 1 de Agosto, as águas residuais podem ser classificadas em três categorias:

- i) **Águas residuais domésticas:** águas de instalações residenciais e serviços, provenientes sobretudo do metabolismo humano e de atividades domésticas;
- ii) **Águas residuais industriais:** águas residuais provenientes de qualquer tipo de atividade que não possam ser classificadas como águas residuais domésticas nem sejam águas pluviais;
- iii) **Águas residuais urbanas:** águas residuais domésticas ou a mistura destas com as águas residuais industriais ou com águas pluviais.

Os níveis de tratamento típicos a que os efluentes estão sujeitos dependem das características quantitativas e qualitativas das águas residuais, população equivalente abrangida (PE), localização do sistema, características do corpo de água que os recebe e valores-limite de emissão de efluentes e outras diretrizes locais ou dos parâmetros requeridos para reutilização (Pabi *et al.*, 2013; Simões *et al.*, 2008). De acordo com o Decreto-lei nº 152/97, de 19 de junho, na Tabela 3.1, apresentam-se as concentrações admissíveis de descarga nos meios recetores relativamente aos parâmetros: carência bioquímica de oxigénio (CBO₅), carência química de oxigénio (CQO) e sólidos suspensos totais (SST), bem como a percentagem mínima de remoção dos mesmos.

Tabela 3.1 - Requisitos para as descargas das estações de tratamento de águas residuais urbanas (Fonte: Decreto-Lei nº 152/97).

Parâmetro	Concentração admissível	Percentagem mínima de remoção
CBO ₅ (a 20°C)	25 mg O ₂ /L	70-90
CQO	125 mg O ₂ /L	75
SST	35 mg/l em ETAR cuja PE > 10 000 60 mg/l em ETAR 2 000 < PE < 10 000	90 em ETAR cuja PE > 10 000 70 em ETAR 2 000 < PE < 10 000

3.2. Fases de tratamento

Na Tabela 3.2 é apresentada uma descrição sumária dos tipos de tratamentos de águas residuais de ETAR, bem como as respetivas operações unitárias e processos abrangidos em cada fase. De ressaltar que nem todas estas etapas necessitam de estar presentes para ser assegurada a qualidade exigida por lei na descarga do efluente final. As ETAR usualmente abrangem as etapas de tratamento primário e tratamento secundário (Gude, 2015a). Caso seja necessário um tratamento mais exigente do efluente é ainda possível recorrer a tratamento terciário onde se enquadra a desinfecção final.

Tabela 3.2 – Objetivos das fases e respetivas etapas de tratamento nas ETAR (Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 2004; Simões *et al.*, 2008).

Fases de tratamento		Objetivo	Operação unitária/processo
Fase líquida	Pré-tratamento	Remoção de materiais mais volumosos que possam danificar os equipamentos da estação, bem como os órgãos a jusante.	Gradagem Tamisação Desarenação Flotação Desengorduramento Homogeneização Equalização
	Primário	Separação da fase sólida da fase líquida através da remoção parcial dos sólidos suspensos e de matéria orgânica (sedimentável).	Tratamento químico: Neutralização Adição de reagentes químicos e coagulantes Tratamento físico: Flotação Filtração Decantação
	Secundário	Remoção da maioria de matéria orgânica por processos biológicos (tratamento aeróbio ou anaeróbio) seguidos de processos físico-químicos constituídos por decantadores secundários.	Filtração; Lamas Ativadas; Leitos Percoladores; Discos Biológicos; Lagoas de estabilização; Lagoas Anaeróbias; Lagoas Aeróbias; Digestão anaeróbia; Decantação;
	Terciário	Visa fornecer um tratamento de afinação, pelo que promove um aumento da eficiência de remoção de sólidos suspensos residuais, nutrientes ou outros compostos tóxicos pretendidos bem como remoção de organismos patogénicos.	Filtração Adsorção sobre carvão Troca iónica Osmose inversa Desinfecção (cloro, ozonização, radiação UV entre outras)
Fase sólida	Tratamento e destino final de lamas	Estabilização das lamas, Redução de volume correspondendo ao aumento da concentração de lamas, respetiva desidratação, acondicionamento e armazenamento.	Espessamento Digestão anaeróbia Desidratação Higienização
Fase gasosa		Tratamento de odores e possível cogeração de biogás.	Desodorização Biogás

O tratamento de águas residuais apresenta três fases de tratamento sendo, pelo menos, duas delas obrigatórias em todas as ETAR (Simões *et al.*, 2008):

- i) **Fase líquida** (obrigatória): visa efetuar o tratamento das águas residuais de forma a cumprir os requisitos de descarga exigidos por lei;
- ii) **Fase sólida** (obrigatória): tem por objetivo o tratamento dos sólidos removidos na fase líquida, (também designada por tratamento de lamas);
- iii) **Fase gasosa** (opcional): destina-se ao tratamento dos odores produzidos na ETAR.

3.2.1. Fase líquida

No que diz respeito à fase líquida é ao nível do tratamento secundário que existe uma maior variedade de tecnologias (Simões *et al.*, 2008). Esta fase pode abranger os seguintes processos:

Tratamento preliminar

O tratamento preliminar é constituído por um conjunto de operações físicas, para remoção de sólidos da água residual que possam comprometer os órgãos e processos de tratamento a jusante ou contaminar os cursos de água, bem como evitar obstruções dos circuitos hidráulicos (Simões *et al.*, 2008; Tchobanouglos *et al.*, 2004). Em seguida encontram-se sucintamente descritos os principais órgãos presentes no tratamento preliminar (Simões *et al.*, 2008). De ressaltar que as operações de desarenação e remoção de óleos e gorduras podem ser realizadas no mesmo órgão de tratamento, um desarenador-desengordurador.

- i) Gradagem: sistema de grelhas permitindo a retenção de sólidos de maiores dimensões;
- ii) Tamisação: possui uma função semelhante à operação anterior, contudo pelo facto de possuir uma malha mais fina, possui uma maior eficiência de remoção. Esta operação é efetuada com recurso a equipamento eletromecânicos;
- iii) Desarenação: tem por objetivo a remoção de areias do efluente;
- iv) Desengordurador: visa a remoção de óleos e gorduras no efluente, podendo recorrer à injeção de um fluxo de ar levando à acumulação de gorduras na superfície, o que permite a sua remoção.

Tratamento primário

O tratamento primário consiste na aplicação de processos físicos e químicos visando a remoção de sólidos facilmente sedimentáveis, aos quais se associa uma fração de matéria orgânica (Tchobanouglos *et al.*, 2004). Desta forma, pretende-se alcançar uma redução de pelo menos 20% da quantidade de CBO₅ presente nas águas residuais urbanas e ainda uma redução de pelo menos 50% do total de partículas sólidas em suspensão (SST) (Simões *et al.*, 2008). Esta etapa é constituída por decantação que visa, por ação da gravidade, remover os sólidos em suspensão sedimentáveis. Recorre a um decantador onde o efluente permanece o tempo suficiente para que as partículas suspensas sedimentem.

Tratamento secundário

O tratamento secundário diz respeito a processos biológicos e tem por objetivo remover a matéria orgânica biodegradável existente no efluente na forma coloidal ou dissolvida que não foi removida na etapa de tratamento primário (Simões *et al.*, 2008). Os processos biológicos que decorrem nesta etapa podem ser aeróbios (*i.e.* na presença de oxigénio), anaeróbios (*i.e.* sem oxigénio), anóxicos (*i.e.* sem oxigénio dissolvido e na presença de nitritos e/ou nitratos e ainda processos mistos. Os sistemas podem ainda ser de biomassa fixa, suspensa, híbridos e sistemas combinados (Simões *et al.*, 2008). Em seguida encontram-se sumarizados os processos utilizados para tratamento secundário em ETAR urbanas (Simões *et al.*, 2008).

- i) Lamas ativadas: Constitui um processo biológico de biomassa suspensa com objetivo de transformar a matéria solúvel presente no efluente em matéria sedimentável. O efluente é encaminhado para um tanque de arejamento, no qual é fornecido o oxigénio necessário para que os microrganismos metabolizem a matéria orgânica. Em seguida estes são removidos com recurso a um decantador secundário, onde ocorre a separação da fase líquida e da fase sólida. A concentração ideal de microrganismos no tanque de arejamento é garantida através da recirculação das lamas do fundo do decantador secundário. Constitui o sistema mais comum em ETAR portuguesas podendo apresentar várias configurações: tanques de arejamento convencionais, vales de oxidação e *Sequencing Batch Reactor* (SBR).
- ii) Lagoas: O efluente é encaminhado para um conjunto de lagoas, onde ocorrem processos de degradação através de microrganismos e microalgas que se assemelham aos que ocorrem no meio natural. Existem nas seguintes variações: lagoas facultativas para efluentes de carga orgânica intermédia e para afinação de efluentes de outras lagoas; lagoas de maturação, onde ocorre a remoção de microrganismos patogénicos e nutrientes; lagoas arejadas, onde é fornecido oxigénio através de arejadores mecânicos para aumento da eficiência do tratamento. Constitui um processo biológico de biomassa suspensa.
- iii) Leitos percoladores: sistemas de biomassa fixa onde a degradação da matéria orgânica ocorre devido à biomassa presente aderida em meios de suporte (naturais ou sintéticos), meios esses por onde percola a água residual proporcionando tempo de contacto entre a biomassa e o substrato.
- iv) Discos biológicos: conjunto de discos circulares, dispostos paralelamente e unidos por um eixo horizontal, de forma a proporcionar uma grande área de contacto. Devido à rugosidade da superfície dos discos, os microrganismos aderem e formam um biofilme. Os discos giram em torno do seu eixo e mergulham parcialmente num reator com o efluente a tratar, o que possibilita que os microrganismos fiquem alternadamente em contacto com o ar e com a matéria orgânica. Os equipamentos são usualmente cobertos para evitar a incidência da radiação solar, o desenvolvimento de algas e perdas de calor.

- v) **Biofiltros:** tanques com enchimento de pequenas esferas, que constituem o meio filtrante, mantidas em contacto com o efluente e arejadas com ar introduzido através de uma rede distribuidora existente na secção inferior.

Tratamento terciário

O tratamento terciário constitui a fase de afinação do efluente para a descarga, sendo maioritariamente constituída pela operação de filtração /desinfeção, visando complementar as etapas anteriores, quer pela exigência de qualidade do meio recetor quer pelos usos previstos pelo mesmo, nomeadamente para reutilização de águas residuais tratadas (Simões *et al.*, 2008).

3.2.2. Fase sólida

Na fase sólida são tratadas as lamas provenientes da fase líquida, sendo sujeitas a espessamento, estabilização e desidratação (Simões *et al.*, 2008).

- i) **Espessamento:** visa reduzir o volume de lamas afluente aos órgãos subsequentes, diminuindo as dimensões requeridas desses órgãos e o seu custo de investimento e operação. Nesta fase ocorre também a homogeneização das lamas. Existem os seguintes tipos de espessamento: espessamento por flotação com ar difuso, espessamento gravítico e espessamento mecânico. Estes processos requerem equipamentos eletromecânicos como mesas de espessamento, crivos e centrífugas.
- ii) **Estabilização:** visa evitar, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação, promovendo a mineralização da matéria orgânica, remover microrganismos patogénicos e eliminar odores. Pode ocorrer com recurso aos processos:
- a) **Digestão anaeróbia:** processo de mineralização biológica da matéria orgânica em condições anaeróbias, que permite a produção de biogás para possível valorização através de cogeração;
 - b) **Digestão aeróbia:** processo de mineralização biológica da matéria orgânica através de uma fonte externa de oxigénio, através do qual resultam lamas estabilizadas e dióxido de carbono, não valorizáveis;
 - c) **Esterilização química por adição de cal:** promove a estabilização/desinfeção de microrganismos presentes nas lamas com a adição de cal hidratada (Ca(OH)_2) ou cal viva (CaO);
 - d) **Esterilização térmica:** permite reduzir o teor de humidade das lamas por adição de calor, resultando um produto com 75 a 95% de matéria seca, que pode ser utilizado para vários destinos finais, permite estabilizar e higienizar as lamas, facilitar a sua valorização orgânica ou a sua incineração e reduzir os custos associados ao tratamento das lamas;
 - e) **Compostagem:** processo de degradação biológica aeróbia de resíduos até alcançar a sua estabilização, envolvendo a produção de composto.
- iii) **Desidratação:** visa reduzir o teor de humidade presente nas lamas, tendo sempre em atenção a relação custo/benefício. Possibilita uma redução do custo de transporte das

lamas para o destino final e nas instalações de manuseamento. Realiza-se com recurso a equipamentos eletromecânicos como filtros de banda, filtros prensa ou centrífugas.

3.2.3. Fase gasosa

Tendo em conta que nas ETAR, sobretudo nas fases de tratamento preliminar e tratamento primário, existe produção de odores, bem como de compostos orgânicos voláteis (COV) pela degradação da matéria orgânica presente no efluente, torna-se necessário controlar estes compostos odoríferos (Tchobanouglos *et al.*, 2004; Simões *et al.*, 2008). As principais tecnologias utilizadas para desodorização são os biofiltros, sistemas de adsorção, geralmente de carvão ativado, e os sistemas de lavagem química (*scrubbers*) (Simões *et al.*, 2008).

4. Consumos energéticos das ETAR

O consumo energético representa uma parcela substancial dos custos operacionais totais das ETAR dado que a energia é um *input* necessário para as várias fases do processo de tratamento das águas residuais, como a captura, tratamento e descarga no meio de acordo com os parâmetros legais (Stillwell *et al.*, 2010; Daw *et al.*, 2012). Quanto aos edifícios de apoio, estes consomem tanto energia elétrica como térmica para iluminação e aquecimento. Contudo as necessidades energéticas destes espaços são usualmente baixas equivalendo a menos de 1% do total do consumo energético das ETAR (Liu *et al.*, 2012). Note-se que em condições climáticas mais frias este consumo pode ser superior devido às necessidades de aquecimento.

Verifica-se que o setor das águas residuais consome uma quantidade substancial de energia, sobretudo sobre a forma de eletricidade. Este consumo equivale a aproximadamente 7% do total de eletricidade consumida a nível mundial (Plappally *et al.*, 2011) e constitui cerca de 5 a 30% dos custos operacionais das ETAR (Liu *et al.*, 2012).

Grande parte dos equipamentos das ETAR operam usualmente 24h/dia, sendo que os picos de consumo energético dizem respeito às horas de maior afluência de água residual (Pabi *et al.*, 2013). Com recurso à Figura 4.1, é possível constatar que este consumo usualmente atinge o seu pico por volta das 12h e prolonga-se até ao horário noturno dado que é neste horário que é produzida uma maior quantidade de águas residuais, o que induz a necessidade por uma maior quantidade de energia para a sua recolha e tratamento (Tchobanoglous *et al.*, 2004). De salientar que estas variações estão relacionadas com as características das populações, nomeadamente das suas rotinas diárias, podendo ainda variar sazonalmente.

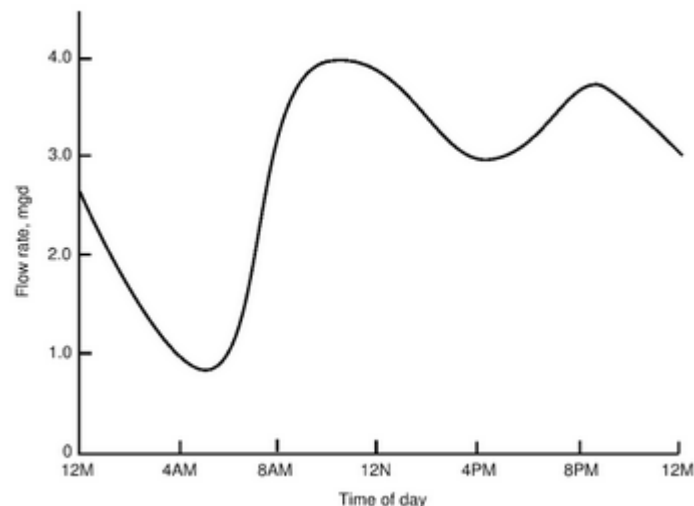


Figura 4.1 – Variação típica diária da afluência de água residual (Adaptado de: Tchobanoglous *et al.*, 2004).

As ETAR usualmente abrangem as seguintes etapas: tratamento primário (tratamentos físicos e químicos), tratamento secundário (tratamento biológico e químico) com sucessivas operações de filtração, desinfecção e arejamento, conforme referido no capítulo 2 (Gude, 2015a). Note-se

que dado que o tratamento de águas residuais depende do ambiente em que as instalações se inserem e características dos efluentes seria improvável que existisse somente um único processo que se adequasse a todas as ETAR, sobretudo na etapa de tratamento secundário visto ser altamente dependente da temperatura e composição dos efluentes (Gao *et al.*, 2014).

A compreensão dos consumos energéticos associados às etapas de tratamento revela-se importante, no entanto é difícil apresentar a distribuição geral dos consumos tendo em conta a variabilidade de tecnologias usadas e outras características específicas. Na Tabela 4.1 são apresentados os consumos médios de eletricidade respeitantes a algumas das etapas do processo de tratamento dos efluentes face aos consumos totais.

Tabela 4.1 – Consumos energéticos das principais etapas de tratamento em ETAR
(Fonte: NEWRI *et al.*, s.d.).

Etapa de tratamento/Processo		Consumo energético (%)
Pré-tratamento	Gradagem	0,01 – 0,1
	Tamisação	1
	Bombagem	15 – 50
Tratamento primário		≤1
Tratamento secundário		50
Tratamento de lamas	Espessamento	Por gravidade: 0,1 – 0,2 Por flotação: 2 – 10
	Digestão anaeróbia	15 – 50
	Desidratação	3 – 10
Desinfeção		≤1

De entre os estudos analisados duas conclusões ressaltam: o consumo energético por volume de efluente tratado nas ETAR tende a diminuir à medida que a capacidade das mesmas aumenta (Mizuta & Shimada, 2010; EPRI, 2002; Belloir *et al.*, 2014; Panepinto *et al.*, 2016; Bodík & Kubaská, 2013; Li *et al.*, 2016; ENEWATER, 2015; Lazarova *et al.*, 2012) e os processos mais consumidores de energia são os processos aeróbios, tratamento de lamas e a bombagem, tal como foi evidenciado na Tabela 3.1 (Tao & Chengwen, 2012; Belloir *et al.*, 2014).

O facto do consumo energético por volume de efluente tratado nas ETAR tender a diminuir com o aumento da sua capacidade verifica-se apesar do aumento dos volumes de água a tratar induzirem um aumento dos consumos energéticos, os equipamentos utilizados tendem a funcionar com maior eficiência. Nestes casos, dada a menor variação na quantidade de água e concentração de poluentes, o processo de tratamento é mais estável refletindo-se numa melhoria da capacidade de tratamento (Reis, 2016; Tao & Chengwen, 2012).

Posto isto, a capacidade de utilização das ETAR constitui um factor que afeta o seu desempenho energético, pelo que, quanto mais próximo da capacidade máxima de utilização as ETAR operarem, mais eficientes serão as suas operações e processos. No entanto, salienta-se que várias ETAR europeias foram, na altura da sua conceção, dimensionadas com base em cenários de crescimento da população que não se verificaram devido ao envelhecimento da população. Isto faz com que muitas destas estações estejam sobredimensionadas em termos volumétricos, o que se reflete quer em termos de cargas orgânicas quer do ponto de vista hidráulico (Reis, 2016; Silva *et al.*, 2012).

De acordo com NEWRI *et al.*, (s.d.), as condições climáticas dos países aparentemente poderão também surtir variações nos consumos energéticos das ETAR, sendo que em condições de baixas temperaturas os consumos tenderão a ser inferiores face a condições mais quentes. Também o tipo de tratamento utilizado nas ETAR influencia os consumos energéticos, assim como os respetivos custos associados, sobretudo em áreas turísticas onde existe uma grande diferença de volumes de água tratados nas épocas de verão e inverno (Lazarova *et al.*, 2012).

Assim sendo, como principais variáveis que afetam o consumo energético das ETAR destacam-se as características de conceção do projeto, que determinam a capacidade de otimização na fase de operação, características do seu equipamento eletromecânico, os critérios de operação selecionados pelo operador da ETAR e ainda a manutenção adequada dos equipamentos e sistemas de controlo implementados (Andreu *et al.*, 2012). A bombagem equivale a uma parte significativa dos consumos energéticos devido ao facto da água ter de ser elevada para ser possível proceder ao seu tratamento. Factores como a distância, altura de elevação, condições climáticas e características das tubagens têm influência nos consumos energéticos associados a etapa (Plappally *et al.*, 2011).

Também nos processos aeróbios, cujos consumos equivalem a cerca de mais de metade dos consumos globais (Tchobanoglous *et al.*, 2004), factores como a eficiência dos compressores podem ter influência nestes valores. Posto isto, a otimização do consumo de energia, processos de recuperação de energia, eficiência das operações de equipamentos e tecnologia e uma gestão adequada dos custos de energia revela-se essencial (Bodík & Kubaská, 2013; Van Horne *et al.*, 2013). Dada esta diversidade de factores, algumas das ETAR conseguem melhorar os seus processos de forma a alcançar os valores de *benchmarking*, no entanto outras estações podem estar otimizadas e ainda assim não alcançar este valor (Awe *et al.*, 2016).

Neste sentido, nos últimos anos tem-se investido na alteração do paradigma atual nas ETAR, transformando-as de consumidores de energia para produtores, existindo cada vez mais oportunidades de forma a aproximar o tratamento de um estado neutro de energia, *i.e.* sem emissões de poluentes relacionados com a produção de eletricidade utilizada nas ETAR. Uma ETAR energeticamente neutra pode então ser alcançada dado que a própria é capaz de produzir, no mínimo, tanta energia como a que necessita para as suas operações, pelo que durante certos períodos consegue manter-se energeticamente autossuficiente sem necessidade de *inputs* de energias de fontes externas (Van Horne *et al.*, 2013). Neste sentido, a combinação de várias tecnologias é a chave (Gao *et al.*, 2014).

A análise da literatura revela que a autossuficiência energética nas ETAR constitui um objetivo alcançável. Porém requer um investimento relativamente alto aliado a uma aposta em eficiência energética (Wett *et al.*, 2007). Assim, apenas um reduzido grupo de ETAR funciona de forma a permitir alcançar esta energia neutra ou perto disso (Van Horne *et al.*, 2013).

De forma geral, para alcançar um balanço neutro de energia existem duas estratégias complementares disponíveis. A primeira diz respeito à minimização dos consumos energéticos pela adoção de medidas de eficiência energética e medidas de conservação e a segunda visa a

recuperação e aproveitamento das condições das ETAR para produção energética. Posto isto, o presente capítulo pretende fazer uma análise a ambas as estratégias e paralelamente apresentar alguns exemplos de ETAR energeticamente neutras e outras que caminham nesse sentido.

4.1. Estudos de *benchmarking*

Muitos dos estudos realizados acerca do desempenho das ETAR centram-se maioritariamente na eficiência do processo em termos de qualidade do efluente final e nos benefícios económicos, em detrimento dos aspetos ambientais e consumos energéticos. Contudo, a avaliação destes consumos é um tópico preponderante pelo que é necessário construir um método para a sua avaliação (Tao & Chengwen, 2012).

Com o intuito de melhorar a eficiência energética e qualidade do tratamento das águas residuais, vários estudos têm vindo a utilizar o processo de *benchmarking* (Belloir *et al.*, 2014; Tao & Chengwen, 2012; Molinos-Senante *et al.*, 2013). Nestes estudos, de forma a analisar as informações e dados e aferir a sua qualidade recorre-se frequentemente a sistemas de indicadores de desempenho (ID) (Jonasson, 2007).

Assim, nos últimos anos várias publicações têm-se centrado na construção de um sistema de ID para avaliação do desempenho em ETAR (Quadros *et al.*, 2012; Silva & Rosa, 2015; Balmér & Hellström, 2012; Alegre *et al.*, 2006). Todavia, estes estudos tendem a focar-se em aspetos ambientais, operacionais, pessoal, qualidade de serviço e económica e financeira, contudo usualmente carecem de uma análise mais detalhada respeitante aos consumos energéticos nas diversas fases de tratamento das ETAR (Foladori *et al.*, 2015).

Com a mesma finalidade, várias iniciativas internacionais desenvolveram projetos como a ferramenta de *benchmarking* dos usos energéticos da *Energy Star*. Outro exemplo é o grupo especializado em *Benchmarking* e avaliação do desempenho no âmbito da Associação Internacional da Água (IWA), que publicou em 2000 o seu primeiro manual sobre ID, o qual incide nos elementos-chave para um estudo de *benchmarking*.

Também a Áustria tem vindo a apostar em processos de *benchmarking*, sendo que anualmente todas as ETAR do país são convidadas a participar neste processo que visa comparar os custos individuais com o desempenho global nacional. Este procedimento tem verificado ser eficaz, tendo permitindo que ETAR austríacas conseguissem alcançar um decréscimo nos seus custos energéticos em cerca de 30% (Wett *et al.*, 2007). Porém, dado que na Áustria o sigilo é valorizado em relatórios governamentais, não existe muita informação disponível (Jonasson, 2007).

Um estudo da Universidade de Lund, na Suécia, estabeleceu um *benchmarking* entre os consumos energéticos de ETAR suecas e austríacas e permitiu evidenciar que as ETAR suecas consomem aproximadamente mais 45% de eletricidade face às austríacas. Estes valores atribuíram-se ao facto de na Áustria existirem programas de *benchmarking* há vários anos, com resultados comprovados e ao facto das águas residuais nas ETAR suecas apresentarem uma maior concentração de matéria orgânica no efluente (175 mg/l na Suécia face a 290 mg/l na Áustria) pelo que necessitam de mais energia para o seu tratamento (Jonasson, 2007).

Esta disparidade poderá ainda dever-se ao facto das ETAR suecas poderem ter recebido águas residuais industriais, sendo assim mais difíceis de tratar dada a sua composição. Em adição, os padrões legais de descarga dos efluentes são mais restritos na Suécia pelo que utilizam mais energia de forma a satisfazer as necessidades de tratamento e garantir a que a qualidade do efluente é adequada para descarga (NEWRI *et al.*, s.d.; Jonasson, 2007). Através da comparação de diferentes estações e pela aprendizagem das melhores práticas revela-se possível atingir melhorias e aumentar o nível de eficiência energética, permitindo assim uma diminuição dos consumos energéticos nas ETAR (Wett *et al.*, 2007).

De acordo com a literatura verifica-se que o ID mais usado para avaliação do desempenho energético é o consumo energético por volume de água tratada (em kWh/m³). Este facto justifica-se recorrentemente pela falta de dados mais específicos nas ETAR, sendo que em muitos dos casos somente dispõem dos consumos globais e não por etapas e demais procedimentos. Contudo, segundo Tao & Chengwen, 2012, o consumo energético por carga orgânica removida (kWh/kg CQO rem.) constitui um ID mais adequado, dado que reflete melhor a alteração do consumo energético influenciada pela alteração da concentração de poluentes nas águas residuais, proporcionando assim um relativamente razoável ponto de referência para avaliação do consumo de energia das ETAR.

De ressaltar ainda que tendo em conta as especificidades das ETAR, as diferenças na metodologia para realização de estimativas de consumos energéticos e a disparidade das características dos efluentes, torna-se difícil de proceder a uma comparação dos resultados obtidos em diferentes estações (Lazarova *et al.*, 2012). A Tabela 4.2 apresenta valores de consumos elétricos específicos reportados na literatura relativos a ETAR com diferentes tipos de sistemas de tratamento de águas residuais. Verifica-se que os sistemas de Bio reatores de Membranas (MBR) constituem os sistemas mais energeticamente exigentes e, por outro lado, o consumo energético associado às lamas ativadas, que constituem o tipo de sistema mais comum em Portugal, tende a variar entre 0,35 e 0,64 kWh/m³.

Tabela 4.2 – Consumos elétricos específicos médios de acordo com os tipos de tratamento dos efluentes (Fonte: EPRI, 1994; EPRI, 1996; ECW, 2002; Pearce, 2008 *fide* Lazarova *et al.*, 2012).

Tipo de tratamento	Consumo específico de eletricidade (kWh/m ³)	Intervalo de valores (kWh/m ³)
Lagoas	0,213	0,08-0,32
Leitos percoladores	0,266	0,19-0,43
Lamas ativadas	0,453	0,35-0,64
Remoção de nutrientes	0,506	--
Lamas ativadas em baixa carga (vale de oxidação)	0,773	0,48-1,04
Bio reatores de Membranas (MBR)	0,986	1,20-1,49

A Tabela 4.3, é apresentada uma síntese dos valores observados relativamente aos consumos específicos de energia elétrica (em kWh/m³) em ETAR por todo o mundo, com diferentes características de operação e condições topográficas e climáticas, que permite constatar uma

grande variação nos consumos de diferentes instalações. Note-se que este indicador não deverá ser utilizado individualmente para avaliar o desempenho energético das ETAR, sendo que deverão ser incluídos outros indicadores na análise tal como os requisitos de descarga.

Tabela 4.3 – Consumo energético por volume de água residual tratada em várias ETAR no mundo

Referência	ETAR	País	Capacidade (PE)	Tipo de tratamento	Consumo específico de eletricidade (kWh/m ³)
Silva & Rosa, 2015	17 ETAR	Portugal	n.d.	Lamas ativadas s/ TP	0,72–1,34
				Lamas ativadas c/ TP	0,31–0,84
				Leitos percoladores	0,16–0,79
Rego, 2012	Vilamoura	Portugal	29 538	Lamas ativadas	0,68
	Loulé		6 438	Lamas ativadas	0,78
	Olhão Nascente		4 064	Lamas ativadas	0,72
	QTA do Lago		7 863	Lamas ativadas	0,98
Rodriguez-Garcia <i>et al.</i> , 2011	24 ETAR	Espanha	40 000 – 117 000	Secundário	0,53*
			117 000 – 265 000	Secundário/ Terciário	0,44*
Molinos-Senante <i>et al.</i> , 2013	177 ETAR	Espanha	n.d.	n.d.	0,82*
Trapote <i>et al.</i> , 2014	Cabezo Beaza Murcia-Este	Espanha	200 000	Secundário	0,29
			> 200 000	Secundário	0,35
Panepinto <i>et al.</i> , 2016	SMAT Castiglione	Itália	2 700 000	Secundário	0,30
Fijins <i>et al.</i> , 2013	Dutch communal water sector	Países Baixos	24 400 000	n.d.	0,30
Lundie <i>et al.</i> , 2004	31 ETAR	Austrália	4 400 000	Secundário	0,42*
Venkatesh & Brattebø, 2011	2 ETAR em Oslo	Noruega	600 000	n.d.	0,33*
Manzano <i>et al.</i> , 2016	Strass im Zillertal	Áustria	250 000	Terciário	0,35
Benedetti <i>et al.</i> , 2008	29 ETAR	Bélgica	< 2 000 > 20 000	n.d.	0,32*
Bodík & Kubaská, 2013	Zvolen	Eslováquia	50 000	n.d.	0,27
	Žilina		80 000	n.d.	0,29
	Trnava		150 000	n.d.	0,54
Belloir <i>et al.</i> , 2014	2 ETAR em East Sussex	Inglaterra	18 554	Terciário (s/ TP)	0,98
			30 792	Terciário	2,32
Fenu <i>et al.</i> , 2010	1 ETAR	Bélgica	28 000	Secundário (MBR)	0,64
Gu <i>et al.</i> , 2016	9 ETAR	China	n.d.	n.d.	0,25 – 0,6
Tao & Chengwen, 2012	1856 ETAR	China	n.d.	n.d.	0,25*
Mizuta & Shimada, 2010	985 ETAR	Japão	n.d.	Vale de oxidação	0,44–2,07
			n.d.	Lamas ativadas convencional	0,30–1,89

* Valores médios; n.d. – informação não disponível; TP – Tratamento primário.

4.2. Eficiência energética nas ETAR

Alcançar um elevado nível de eficiência energética incidindo numa redução dos consumos energéticos, da emissão de GEE e dos custos de operação tem-se revelado cada vez mais um tópico relevante através da escolha de equipamentos e tecnologias mais eficientes, implementação de sistemas de recuperação de energia e de uma gestão de custos mais eficiente (Saghafi *et al.*, 2015). Uma aposta na eficiência energética pode promover benefícios a nível ambiental, económico e outros como: redução da poluição atmosférica e das emissões de GEE; redução dos custos com a energia; suportar crescimento económico através da criação de emprego e desenvolvimento do mercado; melhoria da qualidade da energia e da segurança da qualidade da água; aumento do tempo de vida útil das infraestruturas e equipamentos; proteção da saúde pública (U.S. EPA, 2013).

De forma a apurar quais as operações mais intensivas em termos energéticos, muitas ETAR recorrem a auditorias energéticas. Assim, ao analisar os consumos específicos dos seus processos e equipamentos torna-se mais fácil estabelecer medidas adequadas. Frequentemente em paralelo a esta metodologia é desenvolvida uma análise custo-benefício que visa aferir a viabilidade da substituição de alguns dos equipamentos (U.S. EPA, 2006).

Neste sentido, o Ministério suíço do Ambiente, Floresta e Paisagens publicou em 1994 um Manual de Energia para ETAR (BUWAL). Em 1999, na Alemanha foi também desenvolvido um manual para otimização da energia (MURL), com a coordenação do ministério do ambiente em Nordrhein-Westfalen e abrangendo quase 50% do total de ETAR presentes no país. Ambos os manuais além de descreverem os consumos energéticos (energia elétrica e térmica) das estações e expõem alternativas de como tornar os processos de tratamento de águas residuais mais energeticamente eficientes (Wett *et al.*, 2007).

Estes estudos permitiram uma redução dos consumos energéticos de 38% na Suíça e 50% na Alemanha (Katehis *et al.*, 2010). Ressalva-se que no MURL, tal como no estudo de *benchmarking* efetuado na Áustria, estabelece-se como valor-alvo de consumo energético nas ETAR, o valor de 23 kWh/(PE.ano) (Jonasson, 2007). As razões mais comuns a que se deve um baixo desempenho a nível de eficiência energética são variadas, sendo em seguida apresentados alguns exemplos (De Hass *et al.*, 2015):

- i) Tendência crescente para que as ETAR operem num sistema de arejamento prolongado e parâmetros de descarga de efluentes mais exigentes;
- ii) Necessidade de reciclagem da água devido à escassez do recurso;
- iii) Etapas de filtração e desinfecção cada vez mais energeticamente intensivas;
- iv) A instalação de sistemas de MBR em ETAR;
- v) Requisitos energéticos elevados no que diz respeito à bombagem associados com as características do terreno ou a própria configuração da ETAR;
- vi) Tipos de bombas e motores utilizados;
- vii) Requisitos de mistura das lamas, incluindo número e tipo de agitadores;

- viii) Sistemas de arejamento, incluindo *design*, tipo, idade e condução de operação;
- ix) Falta de mecanismos de recuperação energética;
- x) Baixa eficiência de operação, mistura e sistemas de arejamento.

Como forma de colmatar alguns destes problemas existem várias tecnologias e oportunidades a nível de *design*, controlo e monitorização, eficiência, entre outros, para aumentar a eficiência energética e diminuir o consumo energético nas ETAR. Algumas destas medidas passam pela substituição dos equipamentos por outros mais eficientes, tendo em conta que os últimos permitem exercer o mesmo trabalho por menos *input* energético (Long & Cudney, 2012). Na Tabela 4.4 apresentam-se alguns exemplos de medidas e estratégias de eficiência energética utilizadas em ETAR e respetivos tempos de recuperação do capital.

Tabela 4.4 – Medidas e estratégias de eficiência energética aplicadas em ETAR (Brown, 2009 *vide* Long & Cudney, 2012; Liu *et al.*, 2012; Energy Trust of Oregon, s.d.).

Medidas/ Estratégias de eficiência energética	Descrição	Tempo de recuperação do capital (anos)
Motores de alta eficiência	Motores com menos perdas associadas; utilizados para bombas, aeração, mistura.	Variável
Acionador de frequência variável (VFD)	Controladores eletrónicos que ajusta a velocidade do motor às necessidades, evitando assim um desperdício de eletricidade.	0,5 a 5
Bombas de alta eficiência	Bombas com menos atrito interno e perdas de carga.	Variável
Sobreprensos/ Supressores de alta eficiência	Equipamentos com menos perdas internas.	Variável
Controladores de oxigénio dissolvido (OD)	Permite manter o nível de oxigénio dissolvido nos tanques aeróbios de acordo com as necessidades do sistema.	2 – 3
Sistema de controlo e aquisição de dados (SCADA)	Controlo de supervisão e sistema de aquisição de informação e dados, que permite um controlo dos equipamentos e uma maior eficácia no tratamento.	2 – 5
Aeração de bolha fina	Os difusores de bolha-fina geram bolhas de dimensões inferiores para o processo de aeração; permite uma melhoria do processo de transferência de O ₂ para as águas residuais.	1 – 7
Recuperação de calor da água residual	O excesso de calor das águas residuais pode ser reutilizado em aquecimentos de baixa temperatura.	< 2
Mistura eficiente dos digestores anaeróbios	A mistura mecânica implica um dispêndio energético menor comparativamente ao arejamento.	1 – 3
Otimização e automação do sistema de lamas ativadas	Implementação de novos contadores e novo <i>software</i> .	5
Melhoria do tratamento de lamas eficiente	Espessamento por gravidade consome menos energia nas etapas de desidratação e espessamento das lamas.	Variável
Desinfeção por UV e controlos	Lâmpadas UV de alta eficiência para etapa de desinfeção e controlos para desligá-las quando não são necessárias.	Variável
A melhoria da formação dos operadores	Formação dos operadores de forma a assegurar os objetivos de redução dos consumos.	Variável

Sistemas de arejamentos eficientes que incorporem motores de alta-eficiência, VFD e controladores de OD podem alcançar poupanças de 10 a 25% relativamente ao consumo desta etapa de tratamento comparativamente aos processos convencionais (Pacific Gas and Electric Company, 2006 *vide* EPA, 2006). Os controladores de OD permitem uma poupança energética de cerca de 25% da energia requerida para o arejamento (Jenkins, 1999). Por outro lado, de

acordo com (ESMAP), 2012, a instalação destes equipamentos pode alcançar uma poupança de 11,6%. Saliencia-se que este tipo de controlos não eram muito utilizados no passado, sobretudo pelo facto de necessitarem de manutenção constante, contudo novas investigações permitiram o desenvolvimento de novos sensores e sonda de autolimpeza que permitiram colmatar este problema (Jenkins, 1999).

Dado que 50% a 90% do consumo de eletricidade no processo de arejamento em ETAR é devido aos compressores, qualquer melhoria na eficiência destes equipamentos traduz-se num impacto significativo tanto no uso de energia, como nos custos de operação associados (Jenkins, 1999). Os VFD podem contribuir com redução dos consumos energéticos das bombas até 50% (EPA, 2006) e ainda à redução do consumo energético dos compressores de 10 a 20% com recurso comparativamente aos sistemas convencionais (Jenkins, 1999).

Os motores de alta eficiência são até 8% mais eficientes comparativamente aos motores *standart* pelo que contribuem para diminuição dos consumos elétricos. Estes equipamentos apresentam um custo de investimento superior de 10 a 15% face aos motores *standart* porém dado que apresentam consumos inferiores e menos perdas associadas devem ser considerados em novas compras e substituição de equipamentos (California Energy Commission, Energy Efficient Motors *vide* EPA, 2006).

4.3. Oportunidades de produção e recuperação de energia em ETAR

A possibilidade de recuperação de energia das águas residuais em ETAR possui um potencial significativo de poupança energética, maximização do valor da infraestrutura existente e da mistura de fontes de energia, podendo ser advindo da recuperação de energia dos digestores, calor dos resíduos (Means, 2004). O principal contribuidor no que diz respeito à recuperação energética é o biogás produzido na etapa da digestão anaeróbia.

Paralelamente, a produção de eletricidade em ETAR com recurso a energias renováveis são também opções viáveis para a redução da dependência energética de fontes externas. Além disto, a produção energética com base nestas fontes pode ajudar os países a atingirem as suas metas de desenvolvimento sustentável, através da disponibilização de uma energia limpa, segura confiável e acessível (IRENA, 2012b).

Algumas destas oportunidades de recuperação e produção energética já se encontram bem estabelecidas no mercado e, em oposição, outras tecnologias emergentes necessitam de pesquisa e desenvolvimento adicional. As suas aplicações, além da redução dos consumos energéticos, permitem alcançar uma redução do consumo de combustíveis fósseis e uma melhoria da qualidade do ar, podendo servir de exemplo para futuras ETAR (Means, 2004). Exemplos de processos e tecnologias utilizados em ETAR são a cogeração, conversão térmica de biossólido, FER (e.g. energia solar, eólica e hidroelétrica) e recuperação de energia à cabeça da estação e nas várias etapas de tratamento (WRF, 2015).

Ressalva-se que no processo de seleção das tecnologias a implementar deverá optar-se pelas mais custo-eficazes, confiáveis, fáceis de operar, sem impactos adversos na qualidade da água ou no ambiente (Lazarova *et al.*, 2012). Contudo, o capital de investimento requerido para a aplicação destas tecnologias pode, por vezes, originar um tempo de recuperação do capital muito extenso o que poderá inviabilizar a sua implementação.

Tendo em conta as necessidades energéticas do sector das águas residuais a integração de sistemas solares fotovoltaicos e de outros sistemas de produção por fontes renováveis têm vindo cada vez mais a ganhar relevância. Desde a aprovação da legislação relativa ao autoconsumo em 2014, Decreto-Lei (DL) 153/2014 de 20 de Outubro de 2014, foi alterada a anterior legislação que previa a venda de toda a energia produzida até à data fosse na sua totalidade vendida à rede elétrica de serviço público (RESP), pelo que os consumidores nacionais podem recorrer à produção energética para satisfazer as suas necessidades.

Este DL visa assim a permissão da instalação de unidades de produção para autoconsumo (UPAC), com ou sem ligação à rede, e unidades de pequena produção (UPP) para produção de energia em pequena escala, privilegiando a produção próxima dos locais de consumo ou mesmo integrados nestes locais. Estas últimas unidades visam a venda na totalidade da energia produzida à rede elétrica de serviço público (RESP).

O autoconsumo pode seguir procedimentos para funcionamento ligado à rede ou em sistema isolado. Os sistemas isolados são do tipo de autoconsumo com injeção zero, contudo os sistemas ligados à rede também poderão optar pelo mesmo sistema sem injeção à rede. Note-se que este tipo de investimento, em que se mantém a produção abaixo do consumo, torna o tempo de retorno do investimento mais demorado.

De acordo com o mesmo Decreto-lei, a instalação de uma UP está sujeita a registo prévio e a sua entrada em exploração sujeita à obtenção de certificado de exploração, salvo nas exceções: i) uma UPAC com potência instalada superior a 1 MW carece de licença de produção e licença de exploração; ii) as UPAC com potência instalada superior a 200 W e inferior a 1,5 kW ou cuja instalação elétrica de utilização não se encontre ligada à RESP, está sujeita a mera comunicação prévia de exploração; iii) as UPAC com potência instalada igual ou inferior a 200 W estão isentas de controlo prévio. Adicionalmente os titulares de UPAC que pretendam fornecer energia elétrica não consumida à RESP, mesmo que com potência instalada inferior a 1,5 kW, estão sujeitos a registo prévio e obtenção de certificado de exploração.

A legalização do autoconsumo através de instalações de cogeração foi aprovada mais recentemente, com o DL 68-A/2015 de 30 de abril. Este DL garante para instalações de autoconsumo com energia produzida através de cogeração e que tenham potência elétrica de injeção inferior a 20 MW, a compra de todo o excedente por parte do comercializador de último recurso (CUR). Considera-se que a cogeração opera em modo de autoconsumo quando a energia elétrica produzida se destine ao abastecimento de uma unidade de utilização associada, e a energia térmica se destine ao próprio cogerador ou seja fornecida a terceiros.

Relativamente ao autoconsumo, este passa a ser permitido em Portugal com a entrada em vigor do DL 153/2014, sendo também regulado pela portaria nº14/2015 e pelo DL 68-A/2015.

O novo enquadramento privilegia a produção para consumo no local, existindo um mínimo de injeção na rede. Deste modo, existe a possibilidade de, caso a produção supere o consumo, a energia produzida seja injetada na rede. Todas as UPAC que tenham ligação à RESP e potência superior a 1,5 kW estão sujeitas ao pagamento de uma compensação mensal fixa, nos primeiros 10 anos após obtenção do certificado de exploração. Esta compensação corresponde a uma parcela dos custos de interesse económico geral (CIEG) na tarifa de uso global do sistema e é variável dependendo das seguintes condições respetivamente: i) Valor nulo, quando a potência acumulada de UPAC instaladas não ultrapasse 1% do total da potência instalada no sistema elétrico nacional (SEN); ii) 30% dos CIEG, quando a potência acumulada de UPAC instaladas se encontre entre 1 e 3% do total da potência instalada no SEN; iii) 50% dos CIEG, quando a potência acumulada de UPAC instaladas supere 3% do total da potência instalada no SEN.

Note-se que para estabelecer o dimensionamento da instalação é essencial analisar o perfil de consumo horário do consumo da empresa, tendo em conta aspetos como a sazonalidade. Esta análise é essencial para otimizar a relação entre o investimento e a respetiva poupança associada na fatura energética. Por sua vez esta otimização permite alcançar um período de retorno do investimento menor, tratando-se portanto de um investimento mais atrativo.

Pela análise da Figura 4.2 é possível verificar um exemplo de um perfil de consumo horário de energia elétrica no centro de dia Alzheimer León, analisado pela AS Solar Ibérica, e as curvas de produção solar. Devido ao equipamento de controlo de injeção na rede a produção solar do sistema PV é inferior à procura de eletricidade no edifício. Assim, comprova-se a necessidade de dimensionar e projetar a instalação em função da curva de consumo (AS Solar Ibérica, 2015).

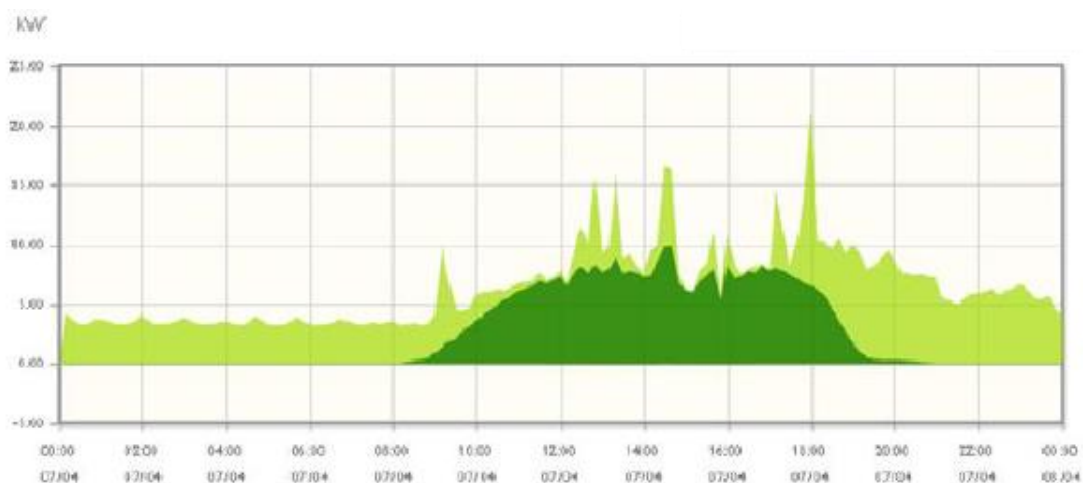


Figura 4.2 – Exemplo de perfil de consumo de energia elétrica (a verde claro) e energia elétrica produzida por sistema PV (Fonte: LACECAL ITR *vide* AS Solar Ibérica, 2015).

De acordo com os objetivos da dissertação, são em seguida abordadas fontes energéticas passíveis de serem utilizadas em ETAR: produção energética por valorização de biogás e por

aproveitamento solar. No subcapítulo referente aos sistemas de aproveitamento solar são abordadas tanto a energia solar térmica como a energia solar fotovoltaica.

4.3.1. Produção de biogás na digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) consiste num processo bioquímico no qual vários tipos de microrganismos decompõem a matéria orgânica complexa em outros componentes mais simples, na ausência de oxigénio. Este processo divide-se nas seguintes fases independentes: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese (Rutz, 2015; Piatek *et al.*, 2016).

Factores de influência no processo de DA

Dado que se trata de um processo biológico, a DA é dependente do potencial metabólico dos organismos e das condições ambientais. Assim, vários factores podem afetar o processo de DA entre os quais se destacam o tipo e concentração do substrato, temperatura, humidade, pH, razão C/N, entre outros (Khalid *et al.*, 2011).

Entre estes factores, a temperatura é um dos mais relevantes dada a sua influência sendo que temperaturas baixas podem inviabilizar o processo, uma vez que originam uma diminuição das taxas de crescimento dos microrganismos e, por outro lado temperaturas excessivamente elevadas podem induzir uma diminuição dos substratos disponíveis, assim como o aumento da concentração de amónia que suprime a atividade metanogénica (Khalid *et al.*, 2011).

Assim, a produção de biogás pode ser realizada em digestores em três gamas de temperatura, geralmente aquecidos pela fração de energia térmica produzida que tende a variar entre 20% a 40% de forma a potenciar a degradação da matéria orgânica por ação dos microrganismos. Os três níveis de temperatura são: psicrófilo (abaixo de 25°C), mesófilo (25°C a 45°C) e termófilo (45°C a 70°C) (Rutz, 2015).

A temperatura mais frequentemente utilizada é a mesófila (Bachmann, 2015), sendo que de acordo com Khalid *et al.*, 2011, a melhor temperatura operacional é de 35°C durante um período de digestão de 18 dias. Relativamente ao pH, constitui igualmente um factor influente sendo que de acordo com Khalid *et al.* (2011), o valor para que um digestor opere nas melhores circunstâncias, é um valor próximo de 7, idealmente, entre 6,8 e 7,2.

Por outro lado, os principais elementos necessários à síntese do material orgânico são o carbono, o azoto e o hidrogénio, entre outros elementos em menores quantidades como enxofre, fósforo, fosfolípidos, ATP, potássio, cálcio, magnésio e ferro. Destes o azoto assume uma grande importância, sendo que para um bom funcionamento do processo anaeróbio a relação entre o carbono e o azoto (razão C/N) deve ser entre 15 e 30 (Santos, 2000).

Características dos digestores anaeróbios

Este processo é realizado em digestores anaeróbios, cujo sistema de alimentação pode ser efetuado por dois modos: sistema de alimentação descontínuo, nos quais a alimentação da lama

ao digestor não é efetuada em permanência; e sistemas de alimentação contínuos, o formato mais frequente, onde o volume de lamas no digestor é constante (Santos, 2000).

Estes digestores podem ainda ser agrupados de acordo com duas categorias: digestores de biomassa suspensa e biomassa fixa. No primeiro tipo de digestores a biomassa encontra-se suspensa no líquido do digestor, dotado de alimentação contínua ou semi-contínua e ainda com a possibilidade de serem providos de aquecimento e sistema de agitação. São indicados para tratamento de resíduos semi-sólidos. Os tipos de digestores mais comuns dentro desta categoria são: reator de mistura completa, reator de contacto, reator de leito de lamas de fluxo ascendente e reator de fluxo pistão (Santos, 2000).

Por outro lado, nos digestores de biomassa fixa, a biomassa encontra-se fixa a um meio de suporte inerte induzindo um tempo de retenção superior ao tempo de retenção do efluente a tratar. São adequados para o tratamento de substratos com baixo teor em sólidos. Dentro desta categoria destacam-se os digestores mais comuns: filtro anaeróbio ascendente, filtro híbrido anaeróbio e reator de leito expandido e reator de leito fluidizado (Santos, 2000).

Biogás como recurso energético

O processo de DA em ETAR, associado à linha de tratamento da fase sólida, tem como finalidade mineralizar as lamas produzidas visando a produção de biogás, cuja composição é sobretudo metano (40-80%), dióxido de carbono (15-45%) e ainda por outros compostos em menores quantidades como o sulfureto de hidrogénio, amónia, azoto, entre outros (Rutz, 2015). O biogás produzido é então submetido a secagem e remoção de componentes indesejáveis como o sulfureto de hidrogénio de forma a alcançar o maior teor em metano possível pois quanto maior for, mais eficiente é o processo de conversão em energia (Rutz, 2015; Bachmann, 2015).

O metano é um gás inodoro e incolor, e possui um poder calorífico de 39,8 MJ/m³. Por outro lado, o Sulfureto de Hidrogénio é um gás tóxico e corrosivo, pelo que para teores superiores a 50 ppm, é recomendada a dessulfurização do biogás, de forma a evitar danos de corrosão nos dos aparelhos de conversão de energia (Portal das Energias Renováveis, 2016). Em condições normais de pressão e temperatura (PTN), o metano puro apresenta um PCI de 9,44 kWh/m³. Por outro lado, o biogás com um teor de metano entre 50% e 80% terá um PCI entre 4,72 kWh/m³ e 7,55 kWh/m³ (Santos, 2000).

O processo de conversão de biogás em biometano pode ser efetuado com recurso a equipamentos de conversão energética, como os motor-geradores, através de um processo de cogeração, que se consiste na produção de duas ou mais formas de energia a partir de uma fonte de energia primária. Desta forma é obtida uma produção de energia elétrica e térmica em simultâneo (Bachmann, 2015). Seguidamente são apresentadas algumas das vantagens (de i a x) e as desvantagens (de xi a xv) deste método de produção energética (Shen *et al.*, 2015; Khalid *et al.*, 2011):

- i) É uma fonte de energia renovável;
- ii) Reduz os custos de operação/custos energéticos;

- iii) Tecnologia bem implementada no mercado;
- iv) Permite uma redução do consumo de energia primária, bem como do impacto ambiental associado à produção de energia elétrica de fontes não renováveis;
- v) Reduz as necessidades de *inputs* energéticos de fontes externas;
- vi) Permite gerar receitas adicionais;
- vii) Produz um combustível de alta qualidade;
- viii) Diminui as emissões de GEE, amônia e partículas;
- ix) Promove o sequestro de carbono;
- x) Promove a criação de emprego
- xi) Custos de investimento e de operação consideráveis;
- xii) Tempos de retenção longos;
- xiii) Sensibilidade dos microrganismos;
- xiv) Dificuldade na biodegradação de materiais com estrutura lenho-celulósica;
- xv) Pode existir produção de maus odores.

4.3.2. Aproveitamento de energia solar

O Sol constitui a maior fonte de energia disponível na Terra. A energia solar é um recurso indispensável para a existência de vida na Terra, tendo um papel essencial no desencadeamento de processos químicos e biológicos (GREENPRO, 2004). Esta energia pode ser utilizada de diversas formas, das quais se destacam a energia solar térmica e energia solar fotovoltaica.

No que diz respeito à análise de sistemas solares fotovoltaicos importa é imprescindível esclarecer os seus princípios de funcionamento. A energia solar diz respeito à energia proveniente do Sol e que alcança a Terra sob a forma de irradiação, A irradiação solar refere-se a essa potência por unidade de tempo, ou seja, representa a energia emitida pelo Sol e é expressa em Wh/m². Esta radiação pode, por sua vez, ser dividida nas seguintes componentes (GREENPRO, 2004):

- i) Radiação direta: fração que atinge a superfície terrestre diretamente, sem reflexões. As condições atmosféricas, nomeadamente nebulosidade, tornam-na variável ao longo do dia;
- ii) Radiação difusa: fração que é desviada pelos constituintes da atmosfera como nuvens, poeiras e vapor de água, levando à sua dispersão;
- iii) Radiação refletida no albedo: fração procedente da reflexão do solo e objetos circundantes, frequentemente integrada na radiação difusa.

Energia solar

Energia solar térmica

A energia solar térmica permite a geração de energia para fins de aquecimento de água e de espaços. O aproveitamento desta energia é efetuado com recurso a coletores solares térmicos convertem diretamente a luz, que penetra através dos vidros em calor, normalmente usados para aquecimento de espaços e de água (GREENPRO, 2004).

O calor é gerado através da absorção dos raios solares através de uma placa metálica, denominada placa absorvora, que se comporta como um corpo negro. Neste equipamento estão incorporados um sistema de tubos que permitem a transferência do calor produzido para o fluido de transferência térmica que por sua vez flui para o tanque de armazenamento de água quente. Assim, os coletores estabelecem a ligação entre a energia proveniente do sol e os utilizadores de água quente. Geralmente este calor é transferido para a água potável através de um permutador de calor (GREENPRO, 2004).

A maioria dos sistemas solares, que são comercializados e instalados funcionam com um fluido de transferência térmica que é composto por uma mistura de água com anti-congelante para proteger os coletores do perigo de congelamento. Este líquido é composto por uma mistura de água e glicol, que circula num circuito fechado podendo ser utilizado em sistemas de transferência indireta de calor através de um permutador (GREENPRO, 2004).

O tempo médio de vida útil destes equipamentos varia entre 20 a 25 anos e o tempo de recuperação do capital é entre 5 a 15 anos. De ressaltar que os custos de implementação desta tecnologia pode ser elevado, porém os custos de manutenção são reduzidos face a outras tecnologias concorrentes (Brechlin *et al.*, 2003).

Energia solar térmica de concentração

A energia solar térmica concentrada é uma tecnologia de produção energética que utiliza espelhos ou lentes de forma a concentrar os raios solares e aquecer o fluido e produzir vapor. O vapor aciona uma turbina e gera energia de mesma forma que as centrais elétricas convencionais. O aspeto inovador desta técnica face aos sistemas de energia térmica convencional prende-se assim com o facto de captar e concentrar a energia solar para fornecer o calor necessário para gerar eletricidade (IRENA, 2012a).

Estes sistemas podem ainda possuir equipamentos de armazenamento de calor de forma a gerar energia mesmo nos horários de indisponibilidade solar e condições climáticas adversas à produção. Este factores facilitam a ligação à rede, bem como a competitividade económica do sistema. Alguns dos componentes dos sistemas de energia solar concentrada são baseados em tecnologias que já se encontram maduras no mercado e não sendo esperadas rápidas reduções nos seus custos (IRENA, 2012a).

Existem duas variações deste tipo de sistemas de aproveitamento de energia: Sistemas de Concentração Linear e Sistema de Concentração Pontual, que por sua vez se dividem em Sistema de Concentração Pontual em Torre e Sistema de Concentração Pontual de Disco/Stirling (IRENA, 2012a). Os sistemas lineares incluem sistemas móveis de um eixo e, por oposição os sistemas pontuais incluem sistemas móveis de dois eixos.

Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica (PV) consiste na energia obtida através da transformação direta da luz em eletricidade, sendo a célula PV a unidade fundamental neste processo de conversão.

Neste processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio (GREENPRO, 2002).

Portugal é dos países europeus com maior potencial solar PV da Europa, apresentado índices de irradiação solar elevados. Possui adicionalmente uma média anual entre 2500 a 3200 horas de radiação solar (IS-Energy, 2015). Ao contrário dos sistemas de concentração solar, estes operam tanto na presença de irradiação solar tanto direta como difusa (Taylor *et al.*, 2014).

A célula de silício cristalina é a mais utilizada abrangendo cerca de 95% da produção mundial. Este material apresenta uma disponibilidade quase ilimitada, tratando-se o segundo elemento químico mais utilizado na Terra. O preço destas células é motivado pelo facto de que para que possa ser utilizado nas células solares deve ser da maior pureza possível sendo necessárias sucessivas etapas na produção química (GREENPRO, 2002). Em seguida, na Tabela 4.5, são apresentadas as tecnologias de algumas células solares PV existentes no mercado, bem como as suas características.

Tabela 4.5 – Características específicas de algumas das tecnologias aplicadas para aproveitamento solar (Fonte: GREENPRO, 2002).

Tecnologia	Eficiência (%)	Dimensões (m×m) / Espessura (mm)	Estrutura	Cor
Silício monocristalino	15 – 18	10×10 / 12,5×12,5; 0,30	Homogénea	Azul-escuro, preto, cinzento
Silício policristalino	13 – 15	10×10 / 12,5×12,5 / 15×15; 0,3	Cristais com várias orientações	Azul, cinza, prateada
Silício-amorfo	5 – 8	0,77×2,44 / 2×3; 1 – 3	Homogénea	Castanho avermelhado, preto
Células solares HCl	17,3	104×104; 0,2	Homogénea	Azul-escuro a preto

A eficiência de conversão de uma célula PV diz respeito à percentagem da energia solar que abrange os painéis e que é convertida em eletricidade passível de ser utilizada. Melhorar esta eficiência tem sido um dos principais objetivos dos investigadores, permitindo que a tecnologia alcance um preço mais competitivo no mercado (U.S. Department of Energy, 2013a).

Esta eficiência é influenciada por factores como a temperatura, sendo que o sistema opera melhor a temperaturas mais reduzidas. Por outro lado, temperaturas mais elevadas fazem com que as características do semicondutor se alterem provocando um ligeiro aumento da corrente, porém uma grande diminuição da voltagem. Podem ainda danificar a célula e outros aparelhos do sistema levando a um tempo médio de vida útil inferior (U.S. Department of Energy, 2013a).

Cada painel solar é composto por células solares ligadas entre si, que por sua vez, são semicondutores que convertem a luz solar em energia elétrica. Estes sistemas podem ser instalados nos telhados dos edifícios ou sobre a superfície do solo, sendo que os últimos são usualmente dispostos na proximidade dos pontos de consumo (Iowa Energy Centre, 2016).

Os painéis podem ter uma inclinação fixa ou, por outro lado, terem a capacidade de acompanhar a trajetória solar (Iowa Energy Centre, 2016; GREENPRO, 2002). No caso dos sistemas móveis podem ser de um ou dois eixos e apesar de a sua implementação induzir um incremento no

preço do sistema global, maximizam a quantidade de eletricidade produzida até 25% e 45%, no caso de um e dois eixos respetivamente (Navarte & Lorenzo, 2008).

De forma geral, a tecnologia aplicada é relativamente simples, dado que o sistema não possui partes móveis exceto quando são instalados estes sistema móveis e a maioria dos componentes eletrónicos apenas necessitam de fios de ligação (Iowa Energy Centre, 2016).

Estes sistemas podem ainda ser ligados à rede ou serem destinados para autoconsumo. Nos últimos, a energia solar produzida pretende substituir a dependência por outras fontes externas de energia. Contudo dado que nem sempre é possível assegurar a energia necessária, particularmente nas horas noturnas e dado que por vezes existe produção em excesso torna-se necessário que os consumidores estejam paralelamente ligados à rede elétrica (sistemas híbridos) ou que considerem um sistema de armazenamento (baterias) (Iowa Energy Centre, 2016; GREENPRO, 2002). De ressaltar que as baterias possuem ainda um preço elevado. Em oposição ao cenário Português, em alguns países como na Alemanha, os sistemas PV são maioritariamente ligados à rede, sendo que a totalidade da produção energética produzida é injetada na rede dado que o valor de venda gera uma receita adicional face ao cenário de autoconsumo (GREENPRO, 2002).

Um sistema autónomo usual dispõe dos seguintes componentes: módulos PV, regulador de carga e bateria. Em oposição, os sistemas ligados à rede são compostos por módulos PV (com estruturas de suporte e montagem), caixa de junção, AC-DC, inversor e mecanismo de proteção e aparelho de medida (GREENPRO, 2002). O regulador de carga permite salvaguardar a bateria de qualquer dano pela falta de fluido ou por uma excessiva concentração de ácido. Por outro lado, o inversor visa converter o sinal elétrico DC do gerador PV num sinal elétrico AC e ajustá-lo para a frequência e o nível de tensão da rede a que está ligado (GREENPRO, 2002).

Posto isto, a quantidade de eletricidade produzida com recurso aos painéis solares PV pode ser impactada pelos seguintes factores: área de implementação; condições climáticas sazonais; grau de inclinação e orientação dos painéis; quantidade diária de horas de sol; contaminantes atmosféricos como poeiras, humidade, entre outros; nebulosidade; e a elevação da terreno em que são implementados (Iowa Energy Centre, 2016; Navarte & Lorenzo, 2008).

Quando se pretender efetuar um investimento em energias renováveis revela-se necessário numa primeira fase analisar a sua viabilidade, sendo que neste tipo de projetos o tempo de recuperação geralmente varia entre os cinco e os sete anos (SEAI, 2010). O custo total do sistema PV tende a variar com base na tecnologia utilizada, na dimensão do sistema e ainda devido ao seu local de implementação (IRENA, 2012b).

Estes sistemas podem exigir um investimento inicial relevante, que se prende na aquisição e instalação de painéis PV, inversores, controladores de carga e baterias (opcionais), porém este investimento é abatido na fase de operação dadas as poupanças energéticas que permite alcançar. Dos componentes integrantes do sistema deve ter-se particular atenção à seleção apropriada dos módulos PV e dos inversores, dado que representam 75 a 85% dos custos totais

do sistema PV (GREENPRO, 2002). O preço dos módulos PV em 2014 foram cerca de 75% inferiores aos preços praticados no fim do ano de 2009.

Por outro lado, os custos de investimento do sistema PV diminuíram entre 29% a 65% entre os anos de 2010 e 2014, dependendo da localidade onde o projeto se insere (Taylor *et al.*, 2014). Estes painéis garantem, em média, uma potência mínima de 80% nos primeiros 25 anos de operação (U.S. Department of Energy, 2013b; Krannich, s.d.). Por outro lado, os inversores têm um tempo útil médio de vida de cerca de 2 a 5 anos, com exceções que alcançam 12 anos. O tempo útil médio de vida das baterias depende da sua utilização, variando entre 2 a 10 anos com uma utilização diária (Krannich, s.d.). De forma sucinta são em seguida apresentadas as vantagens (de i a vii) e as desvantagens (de viii a xii) desta tecnologia (IS-Energy, 2015; Renewable Energy World, 2016; IRENAb, 2012):

- i) É uma energia limpa, sem emissão de GEE na fase de produção de energia elétrica;
- ii) Apresenta uma competitividade crescente face a outros tipos de energia graças à forte redução dos preços da tecnologia, que se prevê que continuem a decrescer, e do contínuo aumento dos preços da eletricidade;
- iii) Os painéis são de fácil instalação e os custos de operação e manutenção são considerados baixos relativamente a tecnologias concorrentes;
- iv) Podem ser ainda uma solução eficaz para suprir os picos de consumo energético;
- v) A modularidade do sistema, pois caso se pretenda alcançar um aumento da energia produzida poderá recorrer-se somente a um incremento de novos módulos, sem a necessidade de alteração total do sistema instalado;
- vi) Utiliza uma fonte de energia gratuita e inesgotável e pode ser utilizada em quase todos os sítios onde existe luz solar;
- vii) Energia não ruidosa, podendo ser implementada em zonas urbanas
- viii) Pode ter intermitências no funcionamento (em horário noturno e dias nublados ou chuvosos) pelo que pode ser necessária uma fonte de energia de apoio;
- ix) Para um fornecimento contínuo de energia elétrica é necessário não só inversores mas também baterias, o que aumenta consideravelmente o custo de investimento;
- x) Os painéis solares possuem níveis de eficiência relativamente baixos (entre 14% e 25%), comparativamente a outras energias renováveis;
- xi) Dada a fragilidade dos painéis PV é importante investir em seguros para salvaguardar o investimento, o que implica custos adicionais;
- xii) Investimento inicial pode ser elevado.

4.4. Exemplos de ETAR energeticamente eficientes

Nos últimos anos, várias ETAR têm vindo a trabalhar no sentido de alcançarem um balanço neutro de energia, sendo em seguida apresentados alguns exemplos. Com maior nível de detalhe e tendo em conta os objetivos da dissertação é apresentada a ETAR de Strass im Zillertal. Selecionou-se este caso de estudo por se tratar de um caso exemplar em termos de desempenho energético, sendo que a produção energética supera a quantidade de energia

requerida para as suas operações. Este factor leva a que seja frequentemente estudada, o que possibilita a existência de um maior número de dados e informações acerca dos seus consumos energéticos e modo de operação. Adicionalmente, o facto de se tratar de uma ETAR europeia e tratar o mesmo tipo de efluentes que os casos de estudo nacionais seleccionados, *i.e.* águas residuais municipais, foi igualmente tido em consideração.

Cada vez mais ETAR recorrem a processos de codigestão para suprimento das suas necessidades energéticas e térmicas. A ETAR Grevesmuhlen, na Alemanha, possui integrado um sistema de cogeração que permite uma produção anual de biogás de 1,95 GWh, o que permite alcançar uma eficiência energética superior a 120% (Schwarzenbeck *et al.*, 2008). Também na América do Norte, são vários os casos em que as ETAR apostam na valorização do biogás, como a ETAR de Gloversville-Johnstown Joint que possui uma autossuficiência energética de 100%, com uma produção anual de biogás de 28 GWh (Ostapczuk *et al.*, 2011).

Outro exemplo é a ETAR de Gresham em Oregon, que alcançou um estado neutro de energia, que permitiu a poupança de cerca de 475 000€ anuais em custos elétricos. Cerca de 92% dos consumos são supridos pelo processo de cogeração e a restante percentagem pelo sistema de produção solar PV instalado. Durante a última década foi ainda possível alcançar uma redução em 17% através da adoção de medidas de eficiência energética tanto ao nível dos equipamentos como ao nível dos processos (Water World, 2016).

A SMAT Castiglione Torinese, situada na Itália, não é energeticamente autossuficiente, porém constitui um bom exemplo de redução dos consumos. Esta estação opera num sistema de lamas ativadas e possui um nível de tratamento terciário, sendo que as diferentes fases de tratamento são combinadas com mecanismos de recuperação e produção de energia, diminuindo assim os custos de operação (SMAT, s.d.).

Em 2015, com recurso aos cogeradores, alcançou uma produção de 42 641 MWh, dos quais 21 107 MWh dizem respeito a energia elétrica e 21 534 MWh a energia térmica. Assim, foi possível atender a 50% do total de energia requerida. Adicionalmente desde Maio de 2011, esta estação dispõe de painéis solares PV, numa área de 43 000 m², o que permitiu alcançar uma produção de energia elétrica de 1 296 MWh em 2015. Esta produção permite satisfazer cerca de 8,7% das necessidades totais de eletricidade, equivalente a uma poupança anual de cerca de 3 milhões de euros em custos energéticos (SMAT, 2015).

A ETAR Cabezo Beaza, situada em Espanha, opera num sistema de lamas ativadas convencional. A inclusão da valorização do biogás possibilitou uma minimização dos consumos energéticos totais em cerca de 20% (Hidrogea, s.d.; Traporte *et al.*, 2014).

ETAR Strass im Zillertal, Áustria

A ETAR de Strass im Zillertal, situada perto de Innsbruck na Áustria, constitui umas das estações com melhor desempenho energético da Europa com uma produção energética superior à requerida para as suas operações (WERF, 2010). Trata-se assim de uma estação

autossuficiente em termos energéticos graças a um programa de melhoria contínua de eficiência energética, assim como à aposta na cogeração.

Esta estação de tratamento de nível terciário serve uma população de cerca de 60 000 habitantes no Verão e 250 000 habitantes na época de maior turismo, no Inverno (WERF, 2010). Em virtude desta sazonalidade e da consequente discrepância de valores de CQO no efluente em ambas as épocas (Nowak *et al.*, 2011) foi necessária a implementação de medidas inovadoras para controlo dos consumos energéticos como as seguintes: implementação de sistema de tratamento de tratamento biológico de águas residuais em dois estágios, melhorias no sistema de arejamento, digestores anaeróbios, equipamento de cogeração e na eficiência energética global dos processos (Nowak *et al.*, 2011; Katehis *et al.*, 2010). Em seguida, na Figura 4.3, é apresentado o sistema de tratamento da ETAR de Strass im Zillertal e posteriormente segue-se uma descrição sumária dos processos e operações referentes às suas fases de operação.

Fase líquida

Na fase líquida é utilizado o tratamento do tipo lamas ativadas em dois estágios, denominado “A-B plant”. Este esquema de tratamento permite uma elevada taxa de remoção da matéria orgânica presente nas águas residuais afluentes sem a necessidade de custos excessivos advindos da etapa de estabilização (WERF, 2010). O estágio A consiste num sistema de lamas ativadas em alta carga com um tempo de retenção de sólidos de 0,5 dias, que atinge uma eficácia de remoção entre 55% a 65% da carga orgânica afluente (Jonasson, 2007).

No estágio B, igualmente do tipo lamas ativadas mas de baixa carga, o azoto é removido por pré-desnitrificação tendo por objetivo alcançar 80% de eficiência de remoção de azoto deste estágio, com concentrações máximas de amónia no efluente de 5 mg/l (Wett *et al.*, 2007). Este estágio é composto por um tanque de arejamento de 10 740 m³ e apresenta um tempo de retenção de sólidos de 12 a 14 dias a uma temperatura entre 9 a 18°C (Nowak *et al.*, 2011). Constitui ainda a maior parcela do consumo energético da ETAR, exigindo cerca de 47% do seu consumo total (Wett *et al.*, 2007).

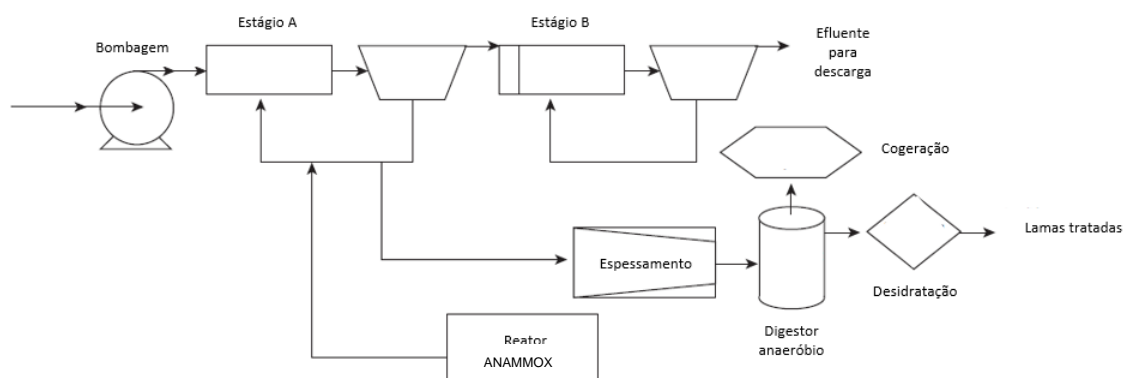


Figura 4.3 – Representação esquemática do sistema de tratamento da ETAR de Strass im Zillertal (Adaptado de Wett *et al.*, 2007).

Fase sólida

As lamas produzidas nos dois estágios são ambas extraídas da linha líquida e submetidas a um processo de espessamento em simultâneo (Godinho, 2014). Posteriormente as lamas são bombeadas para dois digestores anaeróbios em paralelo (a operar em condições mesófilas) com uma capacidade total de 5 000 m³ e, por fim, é efetuada a desidratação mecânica das mesmas (Aichinger *et al.*, 2015; Godinho, 2014).

No ano de 2001 instalou-se um motor de cogeração de 8 cilindros capaz de produzir 340 kW e com uma eficiência de 38%. Apesar da redução dos tempos de retenção das lamas nos digestores, a eficiência do sistema de cogeração não foi prejudicada pelo que se manteve uma boa produção de biogás (Wett *et al.*, 2007).

Resultados Alcançados

A implementação de medidas de eficiência energética permitiu um aumento da autossuficiência energética de 49%, em 1996 (produção de 4,20 kWh/d face às suas necessidades energéticas de 7,36 kWh/d), para 108%, no ano de 2005 (produção de 8,50 kWh/d face às suas necessidades energéticas de 7,87 kWh/d (Nowak *et al.*, 2011; WERF, 2010; Katehis *et al.*, 2010). Estes valores dizem respeito ao balanço global de energia da ETAR.

Uma das medidas mais relevantes tratou-se da introdução de um novo processo de remoção de amónia, em 2004, substituindo o anterior processo de nitrificação/desnitrificação, um *Sequencing batch reactor* (SBR), onde as lamas provenientes do estágio A eram utilizadas como uma fonte de carbono. O processo DEMON® não exige requisitos de excesso de carbono e assim foi possível aumentar o teor de metano das lamas de cerca de 59% a 62%.

Com a implementação deste processo foi possível alcançar poupanças energéticas de cerca de 12% (Jonasson, 2007). Como principais contributos destacam-se a aposta num grupo de trabalho instruído e bem pago, um elevado nível de automatismo dos equipamentos e processos, o uso de ferramentas de análise novas, a capacidade de quantificar os ganhos. Paralelamente, pela implementação de medidas de eficiência energética e na aposta na cogeração foi possível alcançar:

- i) Redução em 50% dos custos com químicos no espessamento de lamas;
- ii) Redução dos custos de desidratação das lamas em 33%;
- iii) Redução no consumo energético no volume de água residual tratado (6,5 €/kg de NH₄-n rem. em 2003 para 2,9 €/kg NH₄-n rem. em 2007/2008) sobretudo pela gestão do OD e conversão do sistema de aeração de convencional bolha fina para um sistema ultra eficiente;
- iv) Redução dos consumos energéticos de 350 kWh/d para 196 kWh/d pela implementação do sistema DEMON;
- v) Aumento da produção do biogás pela adoção de um equipamento com uma eficiência de 33 a 40% e uma produção entre 2,05 a 2,30 kWh/m³ de biogás.

5. Métodos e materiais utilizados para a avaliação dos consumos energéticos nas ETAR e do seu potencial de redução

Tendo por base os objetivos da presente dissertação, optou-se pela análise de casos de estudo comuns, de situações reais de ETAR em Portugal. Foram assim selecionadas as ETAR do Seixal e de Sesimbra de acordo com os seguintes critérios: facilidade de obtenção de informação com o nível de detalhe adequado à análise; proximidade em termos geográficos à residência da autora, caso fosse necessário fazer algum levantamento no local e diversidade do tipo de sistema de tratamento de águas residuais; devendo um dos casos apresentar o tipo de sistema mais frequente em Portugal, *i.e.* lamas ativadas.

5.1. Casos de estudo

Foram selecionados como casos de estudos duas ETAR nacionais que abrangem diferentes configurações, a ETAR do Seixal e a ETAR de Sesimbra. A ETAR do Seixal opera numa configuração de sistema de lamas ativadas e, por outro lado, a ETAR de Sesimbra possui um sistema tratamento por biofiltros. As suas capacidades de tratamento variam entre 6 000 e 44 000 m³/d na ETAR de Sesimbra e do Seixal, respetivamente. Estas estações são geridas pela empresa Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A., constituída pelo Decreto-Lei 94/2015, de 29 de maio, após agregação das empresas Águas do Zêzere e Côa, Águas do Centro, Águas do Oeste, SIMTEJO, SANEST, SIMARSUL, Águas do Norte Alentejano, Águas do Centro Alentejo, integradas no Grupo Águas de Portugal (AdP) (AdLVT, 2016).

A gestão da energia é atualmente uma das prioridades das entidades gestoras destes serviços e o grupo Grupo AdP é responsável por cerca de 1,4% do consumo nacional de energia elétrica. Neste sentido, o grupo tem vindo a apostar na melhoria do seu desempenho energético global das empresas tanto de abastecimento de água como de saneamento, como também ao nível da utilização, consumo e eficiência energética e ainda do aproveitamento do potencial energético dos seus ativos e recursos endógenos (AdP, 2015).

Tanto a ETAR do Seixal como a ETAR de Sesimbra possuem DA a quente com aproveitamento do biogás com recurso a motores de cogeração. Estas ETAR utilizam esta fonte para consumo interno da estação e ainda recuperação de energia térmica para aquecimento das lamas na etapa de DA. Adicionalmente, a ETAR do Seixal dispõe de um sistema de produção de energia através de um sistema solar térmico para suprir parte dos consumos energéticos para aquecimento das águas quentes sanitárias (AQS) e aquecimento ambiente.

De ressaltar que, de momento, a etapa de cogeração na ETAR do Seixal se encontra condicionada por fatores externos, nomeadamente pela entrada de água do estuário, muitas vezes através da rede “em baixa”, o que devido à elevada concentração de sulfatos, condiciona a qualidade do biogás. Este factor inviabiliza a produção de eletricidade por valorização do biogás, uma vez que faz com que a etapa de dessulfurização do biogás instalada na ETAR do

Seixal seja insuficiente quando as concentrações de gás sulfídrico são elevadas (Serrano, 2014). Desta forma, não sendo sempre possível recorrer à cogeração para produção energética, os dados disponibilizados poderão não ser representativos do seu normal funcionamento.

Para efetuar uma correta avaliação do sistema é necessário conhecer as suas características específicas e o seu modo de funcionamento, pelo que em seguida é apresentada a descrição das ETAR em estudo. Posteriormente são apresentados detalhadamente os procedimentos adotados para a avaliação do potencial de redução dos seus consumos energéticos.

5.1.1. ETAR do Seixal

A ETAR do Seixal situa-se na freguesia de Paio Pires, concelho do Seixal. Insere-se no subsistema do Seixal que inclui adicionalmente cerca de 31 emissários e condutas e 7 estações elevatórias. Esta estação opera a nível secundário, com desinfeção, num sistema de lamas ativadas convencional e possui uma capacidade de tratamento 44 000 m³/dia de águas residuais equivalendo a cerca de 156 000 habitantes. As águas residuais por si tratadas possuem como meio recetor o Esteiro do Seixal no Estuário do Tejo (Serrano, 2014). Em seguida é apresentada a configuração do processo de tratamento da ETAR do Seixal.

Fase líquida

As águas residuais recolhidas são encaminhadas para a gradagem, com recurso a dois tamisadores a operar em paralelo tipo “Rotoscreen” com uma malha inferior a 3 mm. Existe ainda um terceiro canal de *by-pass*, onde se encontra uma grelha de limpeza manual com um espaçamento entre grades de 10 mm.

A fase de desarenação/desengorduramento é constituída por um tanque de secção retangular com escoamento horizontal lento. Nos desarenadores a injeção de ar é feita com recurso a turbinas submersíveis de difusão gasosa e posteriormente as areias são removidas com recurso de duas bombas de eixo vertical, uma por cada desarenador. Dispõe também um lavador de areias, do tipo parafuso e com concentrador de gorduras.

Após tratamento preliminar o efluente é enviado para dois decantadores-espessadores lamelares, de soleira inclinada e circular, com mecanismo de raspagem e concentração de lamas de acionamento central. As lamelas são constituídas em módulos em forma de colmeia, completamente submersas com um ângulo de inclinação de 60°. A extração de sobrenadantes dos decantadores primários é efetuada por coletores e a extração de lamas dos decantadores primários realiza-se por gravidade.

Posteriormente o clarificado é enviado para o tratamento biológico com recurso a três reatores de biomassa suspensa, em média carga, de funcionamento contínuo e com uma configuração de tipo fluxo de pistão. O arejamento é realizado por difusores de bolha fina e compressores de arejamento com variação de frequência.

Segue-se a decantação secundária, constituída por 3 decantadores de planta circular e fundo plano, um por cada linha de arejamento, com um diâmetro de 36 m. Cada órgão é equipado com

uma ponte raspadora com raspador de fundo para lamas secundárias, tubos de sucção e raspador de superfície para remoção de escumas. O clarificado passa, por fim, num sistema de desinfecção para canal aberto por UV, recorrendo a lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade e a um sistema de limpeza automático químico e mecânico. Este sistema é capaz de regular a intensidade da lâmpada com base no caudal, transmitância e intensidade de UV, medida por sensor.

Fase sólida

As lamas primárias são diretamente encaminhadas para um tanque de mistura e, por outro lado, as lamas secundárias são enviadas primeiramente para uma fase de espessamento, com recurso a um decantador-espessador mecânico de tambor, e posteriormente para um tanque de mistura de lamas para homogeneização. Seguidamente, as lamas mistas são encaminhadas para dois digestores, onde é efetuada uma DA em regime mesófilo. Nesta fase, a agitação e o aquecimento de lamas é feita através de um efeito de *air-lift* devido à injeção de gás em pressão num tubo interior, enquanto na caixa exterior circula água quente.

Numa fase posterior as lamas são conduzidas para desidratação mecânica, efetuada em duas centrífugas de 44,5 kW de potência nominal, sendo por fim armazenada em dois silos. O biogás produzido na DA é recolhido e armazenado num gasómetro com uma capacidade de armazenamento de 6 h/dia no ano horizonte e funcionamento em baixa pressão. O excesso de biogás é encaminhado para queima numa tocha dimensionada com capacidade para 200% da produção média horária do biogás. A estação dispõe de um motogerador para recuperação de energia, sendo que o biogás passa previamente por um sistema de depuração do biogás, com base na injeção de cloreto férrico na câmara de mistura de lamas.

Fase gasosa

A desodorização é efetuada por via química em torre ácida e torre alcalina.

5.1.2. ETAR de Sesimbra

A ETAR de Sesimbra, inserida no subsistema de Sesimbra que integra um conjunto de reatores e emissários, dois sistemas elevatórios e a ETAR, localiza-se junto ao Porto de Abrigo, na Freguesia do Castelo, Concelho de Sesimbra. As águas recolhidas pela ETAR são conduzidas a esta através de uma rede de drenagem na sua maioria unitária. O meio recetor do efluente tratado da ETAR de Sesimbra é o oceano Atlântico.

Uma vez que a vila de Sesimbra é um ponto turístico nos meses de verão, nesta altura o caudal possui um incremento de cerca de 80% (Machado, 2008 *fide* Pires, 2009). Contudo, o dimensionamento da ETAR não teve em conta a diferença nas épocas alta e baixa pelo que esta igualdade no dimensionamento nas várias épocas do ano leva à existência de vários problemas na operação do sistema, nomeadamente o volume de gás queimado na tocha. Seguidamente é apresentada a configuração do processo de tratamento da ETAR de Sesimbra por fases de tratamento.

Fase líquida

O efluente é sujeito a tratamento preliminar com recurso a tamisadores do tipo Aqua-Guard® ou tipo Step Screen® no final de cada canal. Após este passo o efluente é encaminhado para o SEDIPAC 3D®, que combina num só órgão as operações de desarenação, desengorduramento e decantação lamelar. À saída deste órgão existem outros tamisadores para impedir o entupimento dos biofiltros.

Segue-se o tratamento secundário, no qual o efluente é conduzido para as caixas de admissão aos biofiltros. O sistema de biofiltração é composto por duas etapas que garantem a remoção da poluição carbonácea e a nitrificação do azoto amoniacal. A primeira etapa é constituída por quatro Biofor C e a segunda por dois Biofor C+N. Numa fase posterior o efluente dos Biofor é encaminhado a uma cisterna de água suja que é posteriormente elevada para o canal de entrada do SEDIPAC 3D®. Após tratamento biológico o efluente é sujeito a uma desinfeção por UV constituído por vários módulos numa estrutura de aço inox que suporta fiadas com 8 lâmpadas cada. Esta fase de tratamento possui ainda uma cisterna de água desinfetada com uma capacidade de 40 m³, que é utilizada como água de serviço.

Fase sólida

Tendo em conta que o tratamento biológico é realizado por biofiltros e a água da sua lavagem retorna ao Sedipac 3D®, leva a que se gerem lamas mistas na zona de decantação. Assim, as lamas provenientes da decantação conjunta do efluente bruto e da água de lavagem dos biofiltros na fase líquida são encaminhadas para espessamento, com recurso a um espessador gravítico.

Posteriormente, as lamas espessadas são enviadas para dois digestores anaeróbios, em regime mesófilo, onde sofrem um processo natural de estabilização ao longo de aproximadamente 18 dias. Por fim, após digestão são encaminhadas para desidratação mecânica efetuada por uma centrífuga, sendo por fim armazenada em dois silos.

A ETAR dispõe de um sistema de cogeração que permite a produção de energia térmica e elétrica. Assim, o biogás produzido pela DA é recolhido e armazenado num gasómetro com funcionamento em baixa pressão e enviado para o motor de cogeração, previamente passando por um sistema de depuração, com vista a remover os constituintes agressivos para o motor (Degrémont, 2001). Caso o biogás não esteja a ser gasto na cogeração pode ser armazenado temporariamente no gasómetro, utilizado na caldeira ou em último caso queimado na tocha.

Fase gasosa

A desodorização da ETAR de Sesimbra atualmente é realizada através de biofiltração pelo sistema OBiT, processo desenvolvido pela empresa WeDoTech, tendo-se convertido as torres de desodorização química num sistema de biofiltração. O ar é aspirado da obra de entrada, contentores de armazenamento de gradados, areias e gorduras, do espessador, centrífuga e silos de armazenamento de lamas.

5.2. Metodologia para avaliação do potencial de redução do consumo de eletricidade das ETAR

Para avaliar o potencial de redução dos consumos elétricos das ETAR, foram formulados os seguintes três cenários de análise:

- i) **Situação de Referência:** incide na análise dos consumos de eletricidade, constituindo a medida base que serve de comparação para a avaliação de desempenho energético;
- ii) **Análise dos consumos de eletricidade:** avalia os consumos energéticos da ETAR em estudo e analisa quais as possíveis medidas de eficiência energética passíveis de serem implementadas;
- iii) **Cenário de produção energética:** analisa a viabilidade da implementação de sistemas de produção energética para autoconsumo.

A Figura 5.1 apresenta o esquema metodológico utilizado na presente dissertação, sendo em seguida apresentado com maior nível de detalhe nos subcapítulos seguintes.

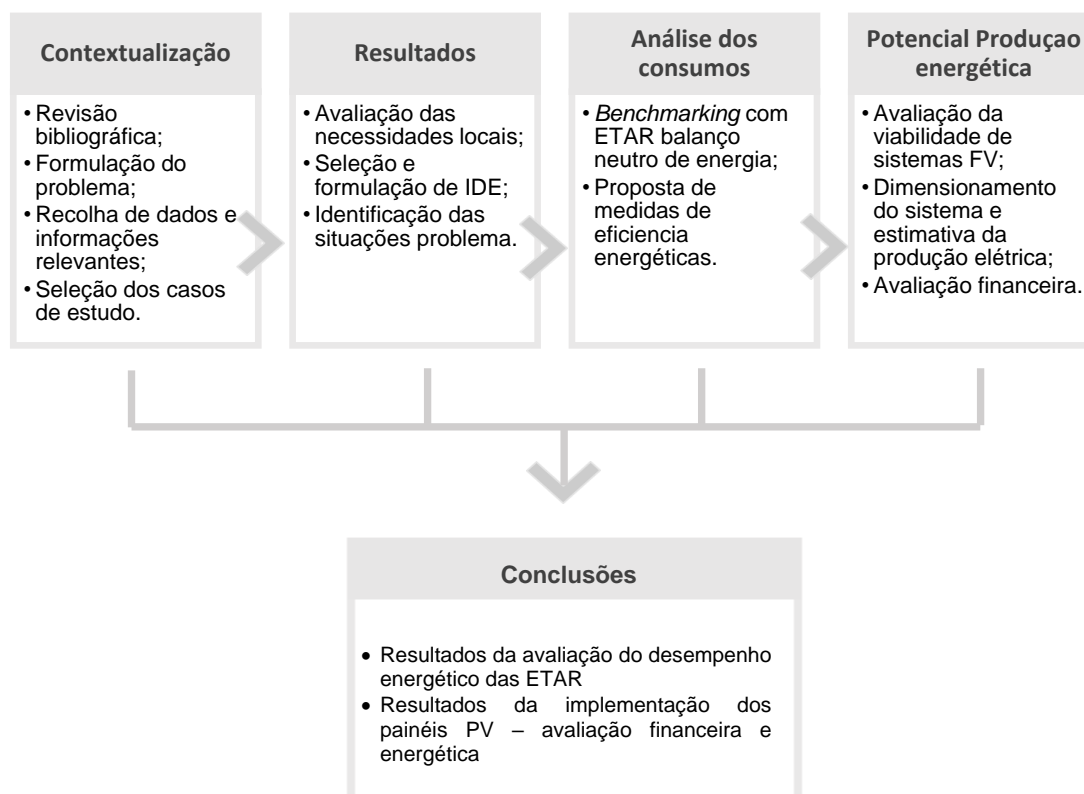


Figura 5.1 - Fluxograma metodológico da dissertação.

De acordo com o DL nº 71/2008, de 15 de abril, a ETAR do Seixal é classificada como uma instalação consumidora intensiva de energia dado que possui um consumo energético superior a 500 tep/ano. Esta instalação é assim obrigada a promover o registo das instalações, efetuar auditorias energéticas e com base nestas elaborar planos de racionalização do consumo de

energia (PREn), executá-los e cumpri-los. Sendo esta ETAR abrangida pelo Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) é ainda obrigada ao reporte dos seguintes IDE:

- i) Autonomia energética (%);
- ii) Consumo específico de energia elétrica (kWh/m³);
- iii) Custo de energia reativa sobre o custo total da fatura (%);
- iv) Consumo específico por carga orgânica (kWh/kg CBO₅);
- v) Consumo específico por habitante equivalente (kWh/PE);
- vi) Consumo específico de energia (kgep/m³);
- vii) Intensidade Energética (kgep/€);
- viii) Intensidade Carbónica (tCO₂/tep).

Este facto possibilitou a recolha de informações e dados com um maior nível de detalhe, comparativamente à ETAR de Sesimbra, dado que esta não constitui uma instalação consumidora intensiva de energia. Consequentemente para esta ETAR foi necessário recorrer a mais extrapolações de dados e estimativas para o cálculo dos IDE selecionados.

5.2.1. Situação de Referência

Para a avaliação dos consumos atuais da ETAR foram tidos em conta dados provenientes de Mendes (2014) e Marques (2016) sendo que esta última foi fornecida pelos Eng.^a Lisete Epifânio e Eng. José Pacheco, da ex-SIMARSUL, atual EPAL. Alguns destes dados necessitaram de ser corrigidos dado que os dados disponíveis em Marques (2016) respeitantes aos consumos energéticos por equipamentos possuíam incertezas associados consideráveis tendo em conta que os consumos foram calculados através das características dos equipamentos e não medidos diretamente (anexo A).

Para avaliação da situação de referência optou-se por utilizar um sistema de indicadores e respetivos valores de referência, nas situações em que foi possível, de forma a identificar o desempenho energético das ETAR. Assim, numa primeira fase e após a revisão de literatura sobre os indicadores de desempenho energético (IDE) utilizados em estudos de avaliação dos consumos energéticos em ETAR, foram selecionados e formulados os que melhor se adequavam à realização do diagnóstico e identificação de oportunidades de melhoria da performance das ETAR aos objetivos da presente tese estando dispostos na Tabela 5.1. O procedimento de seleção dos indicadores encontra-se esquematizado na Figura 5.2. Salienta-se que um maior grau de detalhe não se encontra disponível em ambas as estações, pelo que nem toda a informação requerida para o cálculo dos indicadores pode estar disponível.

Conforme foi explicitado no subcapítulo 4.1, dado que o consumo específico de eletricidade (usualmente medido em kWh/m³) não demonstra a variabilidade encontrada nas diversas etapas da ETAR, recorreu-se à integração de indicadores mais específicos referentes às principais fases de tratamento: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário, filtração/desinfecção, tratamento de odores, recuperação e produção de energia. Estes IDE transmitem a ideia da intensidade energética em vez de somente do consumo total da ETAR.

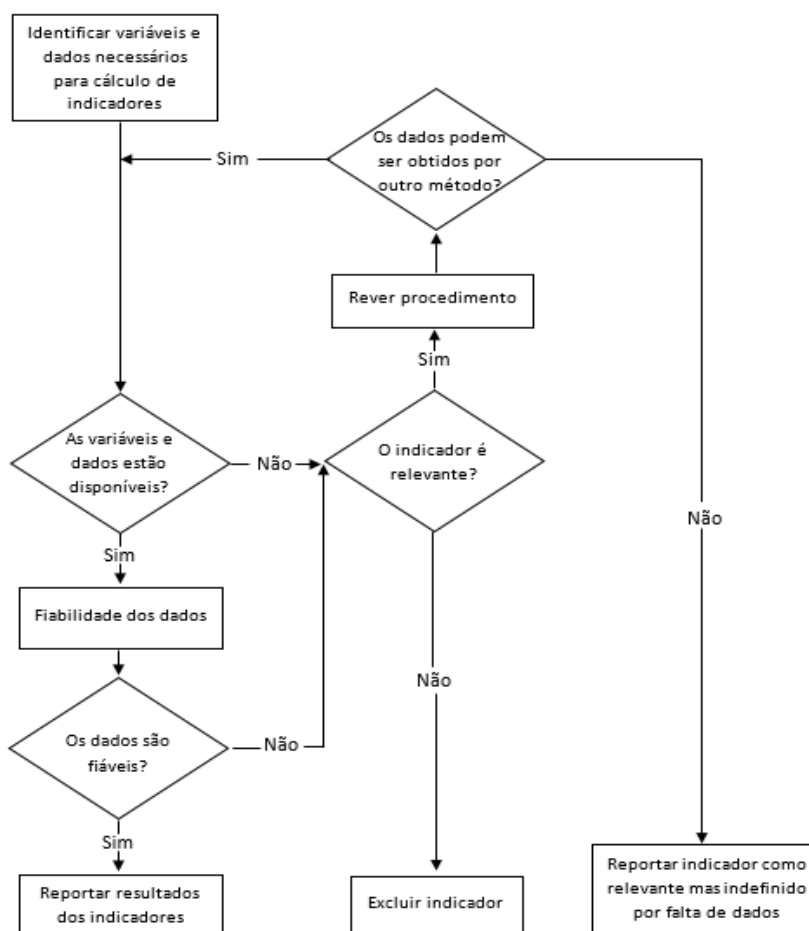


Figura 5.2 – Processo de seleção dos IDE a utilizar.

Tabela 5.1 – Proposta de IDE para avaliação da Situação de Referência (Adaptado de: Silva *et al.*, 2015; ENERWATER, 2015).

Indicador	Fórmula de cálculo
I_{G1} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/m ³)	$I_{G1} = \frac{E}{V_{AR}}$ <p><i>E</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento global da ETAR (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m³).</p>
I_{G2} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/kg CBO ₅ removido)	$I_{G2} = \frac{E}{CBO_5}$ <p><i>E</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento global da ETAR (kWh); <i>CBO₅</i> – Quantidade em kg de CBO₅ removido do efluente (kg).</p>
I_{G3} – Consumo específico de energia elétrica por população equivalente (kWh/(PE.ano))	$I_{G3} = \frac{E}{PE}$ <p><i>E</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento global da ETAR (kWh); <i>PE</i> – População equivalente (PE/ano).</p>
I_{G4} – Adequabilidade da capacidade da ETAR (%)	$I_{G4} = \frac{CU}{CO} \times 100$ <p><i>CU</i> – Capacidade de utilização atual da ETAR (m³/d); <i>CO</i> – Capacidade para que a ETAR foi dimensionada (m³/d).</p>

(continua)

Tabela 5.1 – Proposta de IDE para avaliação da Situação de Referência
(Adaptado de: Silva *et al.*, 2015; Reis, 2016; ENERWATER, 2015) (continuação).

Indicador	Fórmula de cálculo
IPRE1 – Consumo específico de energia elétrica no tratamento preliminar (kWh/m ³)	$I_{PRE1} = \frac{E_{PRE}}{V_{AR}}$ <i>E_{PRE}</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento primário (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
ITP1 – Consumo específico de energia elétrica no tratamento primário (kWh/m ³)	$I_{TP1} = \frac{E_{TP}}{V_{AR}}$ <i>E_{TP}</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento primário (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
ITS1 – Consumo específico de energia elétrica no tratamento secundário (kWh/m ³)	$I_{TS1} = \frac{E_{TS}}{V_{AR}}$ <i>E_{TS}</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento secundário (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
IFD1 – Consumo específico de energia elétrica na filtração/desinfecção (kWh/m ³)	$I_{FD1} = \frac{E_{FD}}{V_{AR}}$ <i>E_{FD}</i> – Energia elétrica anual consumida na filtração e desinfecção (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
ITL1 – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de lamas (kWh/m ³)	$I_{TL1} = \frac{E_{TL}}{V_{AR}}$ <i>E_{FD}</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento de lamas (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
ITO1 – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de odores (kWh/m ³)	$I_{TO1} = \frac{E_{TO}}{V_{AR}}$ <i>E_{TO}</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento de odores (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
IE1 – Autossuficiência energética (%) / Produção de energia elétrica por valorização de biogás (%)	$I_{E1} = \frac{E_P}{E} \times 100$ <i>E_P</i> – Energia elétrica anualmente produzida/recuperada na ETAR (kWh); <i>E</i> – Energia elétrica anual consumida no tratamento global da ETAR (kWh).
IE2 – Produção de energia elétrica por valorização de biogás (kWh/m ³)	$I_{E2} = \frac{E}{V_{AR}}$ <i>E</i> – Energia elétrica anualmente produzida por biogás (kWh); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³);
IE3 – Utilização de energia elétrica produzida por fontes externas (kWh/m ³)	$I_{E3} = \frac{E_R}{E}$ <i>E_R</i> – Energia elétrica de fontes externas anualmente consumida (kWh); <i>E</i> – Energia anual consumida no tratamento global da ETAR (kWh).
IoT1 – Custos com energia elétrica por volume tratado (€/m ³)	$I_{OT1} = \frac{CT}{V_{AR}}$ <i>CT</i> – Custos anuais de energia elétrica na ETAR (€); <i>V_{AR}</i> – Volume anual de água residual tratada (m ³).
IoT2 – Custos da ETAR com consumos energéticos (%)	$I_{OT2} = \frac{CT}{CG}$ <i>CT</i> – Custos anuais de energia elétrica na ETAR (€); <i>CG</i> – Custos operacionais globais da ETAR (€)

Todos os indicadores abrangem consumos indexados contra a produção das unidades de produção (em m³) ou a quantidade de CQO ou CBO₅ presente no efluente de forma a torná-los comparáveis dadas as divergência das características de cada ETAR e respetivos efluentes. Adicionalmente, os indicadores foram formulados de forma a serem fáceis de compreender e de calcular, a fim de serem utilizados os dados que as ETAR usualmente dispõem, sem necessidade de custos de aquisição de dados extra.

Importa ainda referir que, dado que o sobredimensionamento dos equipamentos numa ETAR pode provocar consumos elevados de energia, foi necessário abranger um indicador que refletissem a adequabilidade da capacidade da ETAR (indicador I_{G4}). De acordo com Reis (2016) uma capacidade adequada significa que a estação opera mais do que 60% do tempo com uma utilização entre 70-95% da capacidade máxima. Assim, no caso de uma capacidade de utilização inferior a 50% o desempenho é considerado insatisfatória de acordo com a mesma metodologia.

Note-se que se reconhece a existência de outros indicadores que permitem um cálculo mais preciso da capacidade a que a ETAR se encontra a operar como por exemplo o que se apresenta em seguida na equação 5.1 (indicador I_A). Porém, o seu cálculo necessita de informação com um elevado grau de detalhe, o qual não foi possível de se obter, pelo que não foi considerado.

$$I_A = \left(1 - \frac{\sum_{d=1}^n Qt_d \times J_d + \sum_{d=1}^n Qt_d \times K_d}{\sum_{d=1}^n Qt_d} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

Qt_d – Afluência média diária à ETAR (m³/d);

Qr_d – Afluência diária registada no dia d (m³/d);

n – dia em análise;

$J_d = 1$ se $Qr_d > 0,95 Qt_d$ no dia d ou $J_d = 0$ e $Qr_d \leq 0,95 Qt_d$ no dia d;

$K_d = 1$ e $Qr_d > 0,7/S Qt_d$ no dia d ou $K_d = 0$ e $Qr_d \leq 0,7/S Qt_d$ no dia d;

S – factor de correção; $S = Qr_{30\ max}/Qr_d$; Se $S < 1$, $S = 1$; Se $S > 3$, $S = 3$;

$Qr_{30\ max} = Qr_d$ máximo num período de 30 dias consecutivos (m³/d).

O indicador I_{E1} diz respeito à produção e recuperação de energia nas ETAR, traduzindo-se na autossuficiência da ETAR. Nos casos em que as ETAR somente disponham de sistemas de cogeração, este indicador revela a produção de energia por valorização do biogás. No que diz respeito aos custos com energia elétrica (indicador I_{OT1}) há que ter em conta a disparidade dos preços da eletricidade, pelo que será somente um bom indicador a utilizar caso se pretenda comparar ETAR em regiões com preços similares.

Para os indicadores I_{G1}, I_{G2}, I_{E1} e I_{E3} foram identificados valores de referência e para o indicador I_{G3} o valor-alvo, de acordo com Silva & Rosa (2015), Reis (2016) e Jonasson (2007). Os resultados obtidos são contrastados com estes valores de forma a ser possível proceder à análise do desempenho em termos energéticos das ETAR, sendo classificados de acordo com a sinalética: o símbolo verde diz respeito a um bom desempenho, o amarelo a um desempenho aceitável e, por fim, o símbolo vermelho indicada um desempenho não aceitável. Estes valores

encontram-se apresentados na Tabela 5.2, onde VA corresponde ao volume de água afluyente à ETAR (m³/d) e CBO₅ à concentração de CBO₅ na água residual afluyente à ETAR (mg/l).

No que diz respeito aos VA, foram utilizados os valores médios diários de volume de água afluyente às estações obtidos em Marques, 2016. No caso do parâmetro CBO₅ utilizaram-se os valores médios mensais disponibilizados em Mendes, 2014. Salienta-se que os indicadores I_{E1} e I_{E3} possuem somente valores de referência para o caso de ETAR com tratamento de águas residuais por sistema de lamas ativadas, pelo que somente poderão ser aplicados nestes casos. Nos casos em análise que não operem com este tipo de tratamento de águas residuais não se consideram valores referência, procedendo-se somente à comparação da evolução dos resultados no intervalo de tempo em estudo. Importa ressaltar que a amostra na metodologia dos cálculos dos valores de referencia é pequena o que induz uma menor precisão nos cálculos.

Tabela 5.2 - Valores de referência ou Valor-alvo de alguns indicadores de desempenho energético selecionados.

Referência	Indicador	Valores de referência/Valor-alvo
Reis (2016)	I _{E1}	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ ≤ 0,325 + 1384/VA</div> <div>■]0,325+1384/VA; 0,406+1730/VA[</div> <div>■ ≥ 0,406 + 1730/VA</div> </div>
Reis (2016)	I _{E2}	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ ≤ 2</div> <div>■]2; 10[</div> <div>■ ≥ 10</div> </div>
Jonasson (2007)	I _{E3}	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ 23 kWh/(PE.ano))</div> </div>
Reis (2016)	I _{E1}	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ ≥ 0,0009CBO₅</div> <div>■ [0,0007CBO₅; 0,0009CBO₅]</div> <div>■ < 0,0009CBO₅</div> </div>
Reis (2016)	I _{E3}	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ ≤ 0,280+1192/VA-0,0009CBO₅</div> <div>■]0,280+1192/VA-0,0009C; 0,350+1490/VA-0,0007CBO₅[</div> <div>■ > 0,350+1490/VA-0,0007CBO₅</div> </div>

■ Bom desempenho
 ■ Desempenho aceitável
 ■ Desempenho não aceitável

VA – volume de água afluyente à ETAR (m³/d);
 CBO₅ – concentração de CBO₅ na água residual afluyente à ETAR (mg/l).

Para o cálculo dos indicadores que dizem respeito à produção elétrica por fontes de recuperação e produção energética, no caso das ETAR disporem de sistemas de cogeração para produção de eletricidade, optou-se no âmbito deste trabalho académico por proceder a uma estimativa destes valores. Primeiro, de acordo com a equação (5.2), considerou-se um teor de 60% de metano no biogás (APREN, s.d.) para obtenção do volume deste gás:

$$V_{CH_4} = 0,6 \times V_{biogás} \quad (5.2)$$

Onde,

V_{CH_4} – Volume de metano (m³/d);

$V_{biogás}$ – Volume de biogás (m³/d).

Seguidamente, calculou-se o poder calorífico do gás produzido de acordo com a equação (5.3), tendo por base um poder calorífico do CH₄ de 8 550 kcal/m³ (Tchobanouglos *et al.*, 2014):

$$E = P_{calCH_4} \times V_{CH_4} \quad (5.3)$$

Onde,

E – Energia contida no metano (kcal/d);

P_{calCH_4} – Poder calorífico do metano (kcal/m³).

De forma a evitar sobrestimar os resultados obtidos considerou-se um aproveitamento em 30% do biogás gerado para produção elétrica e igualmente para produção térmica, sendo a produção calculada através das equações (5.4) e (5.5):

$$E_{elétrica} = 0,3 \times E \quad (5.4) \quad e \quad E_{térmica} = 0,3 \times E \quad (5.5)$$

Onde,

$E_{elétrica/térmica}$ – Energia térmica produzida (kcal/d).

Por fim, tendo em conta que 1 kcal equivale a $1\,163 \times 10^{-6}$ kWh, obteve-se o total de energia produzida por cogeração com recurso à equação (5.6):

$$El_{elétrica/térmica} = (1\,163 \times 10^{-6}) \times E_{elétrica/térmica} \quad (5.6)$$

Onde,

$El_{elétrica/térmica}$ – Energia elétrica/térmica produzida (kWh).

À semelhança do que se fez para a estimativa da produção de biogás, também no que respeita aos custos com energia elétrica respeitantes às ETAR, considerou-se um tarifário tetra-horário em média tensão (MT), em opção de ciclo diário, o qual não distingue os dias da semana. Na Tabela 5.3 são apresentados os períodos horários respeitantes a cada horário assim como os respetivos tarifários por semestres.

Nos casos em seja possível obter os dados mensais de consumos de eletricidade utilizaram-se os valores com base nos semestres (de I a IV) e, por oposição, nos casos em que este nível de detalhe de informação não está disponível para o cálculo da estimativa dos custos com eletricidade adotou-se o custo de 0,105 €/kWh, que diz respeito à média ponderada dos valores nos vários horários de consumo, exceto no supervazio.

Tabela 5.3 – Tarifa tetra-horária em ciclo diário.

Horário	Período diário			Tarifário em MT ³ (€/kWh)	
	Verão ¹	Inverno ¹	Geral (s/ distinção sazonal) ²	I e IV	II e III
Ponta	10h30 – 12h30; 20h00 – 22h00	9h30 – 11h30; 19h00 – 21h00	10h30 – 13h00; 19h30 – 21h00	0,1368	0,1397
Cheia	9h00 – 10h30; 12h30 – 20h00; 21h00 – 22h00	8h00 – 9h30; 11h30 – 19h00; 21h00 – 22h00	8h00 – 10h30; 13h00 – 19h30; 21h00 – 22h00	0,1074	0,1096
Vazio	6h00 – 9h00; 23h00 – 2h00	6h00 – 8h00; 22h00 – 2h00	6h00 – 8h00; 22h00 – 2h00	0,0757	0,0784
Supervazio	2h00 – 6h00	2h00 – 6h00	2h00 – 6h00	0,0646	0,0720

¹ CTCP, 2009; ² Agrotejo & Agromais, s.d.; ³ ERSE, 2016

Posteriormente à obtenção dos valores de IDE procedeu-se ainda à análise da correlação entre os consumos elétricos nos anos em análise com as variáveis volume de água residual afluyente, carga orgânica afluyente e, por fim, população equivalente. Assim sendo, foi analisado o valor do coeficiente de determinação (R^2), que traduz a proporção da variação da eletricidade que pode ser explicada pelas variáveis analisadas pelo que quanto mais próximo de 1 maior relação entre as variáveis existe.

5.2.2. Análise dos consumos de eletricidade nas ETAR

Neste cenário pretendeu-se primeiramente analisar os consumos das ETAR selecionadas como casos de estudo, compreender os consumos nas diferentes fases e ainda apresentar sugestões de melhorias de eficiência energética passíveis de serem aplicadas nas mesmas. Paralelamente, apresenta-se um caso de uma ETAR com um balanço neutro de energia, a ETAR de Strass, tendo a sua seleção tido sido suportada com base nos seguintes critérios: i) ETAR europeia de tratamento de águas residuais municipais, para que os padrões legais de descarga assim como os tipos de sistemas de operação fossem o mais semelhante possível aos nacionais; ii) baixo consumo energético específico por volume de efluente tratado; iii) acessibilidade a informação sobre modo de operação, características específicas e dados de dimensionamento; iv) acessibilidade a dados desagregados sobre os consumos específicos de eletricidade.

Note-se que o objetivo em abordar esta última ETAR não será estabelecer uma comparação com os casos de estudo, tendo em conta as especificidades das ETAR, as diferenças na metodologia para realização de estimativas de consumos energéticos e ainda a diferença das características dos efluentes que as tornam diretamente incomparáveis, mas sim demonstrar um caso exemplo de eficiência energética. Neste sentido, procedeu-se a uma análise dos parâmetros legais de descarga dos efluentes na Áustria e os dos casos em análise e das características dos efluentes tratados, nomeadamente as concentrações dos efluentes.

Através da informação estatística disponível sobre os consumos energéticos da ETAR de Strass im Zillertal, apresentados na Figura 5.3, foi possível apurar os consumos de cada processo e agregá-los nas seguintes categorias: pré-tratamento, tratamento preliminar, tratamento

secundário, tratamento de lamas e, por fim, gestão operacional e outros. Esta última categoria abrange os consumos associados à cogeração, tratamento de odores, gestão operacional, filtração/desinfecção, entre outros. Através da mesma Figura é possível comprovar que o tratamento secundário consiste na etapa de tratamento mais energeticamente exigente, sendo que o principal contribuidor deste consumo é o estágio B.

O consumo energético de Strass im Zillertal oscila entre 19 e 22 kWh/(PE.ano), dependendo das variações de caudal e carga orgânica sazonais (Wett, 2016). Assim, considerando um consumo específico de eletricidade de 0,35 kWh/m³ e um caudal médio afluente de 13 274 685 m³/ano estimou-se um consumo anual de aproximadamente 4 646 140 kWh, valor considerado aceitável dado que se encontra no intervalo acima descrito. De ressaltar que o valor do caudal médio afluente anual foi estimado com base nos valores médios do caudal afluente por período sazonal relatados em Katehis *et al.* (2010).

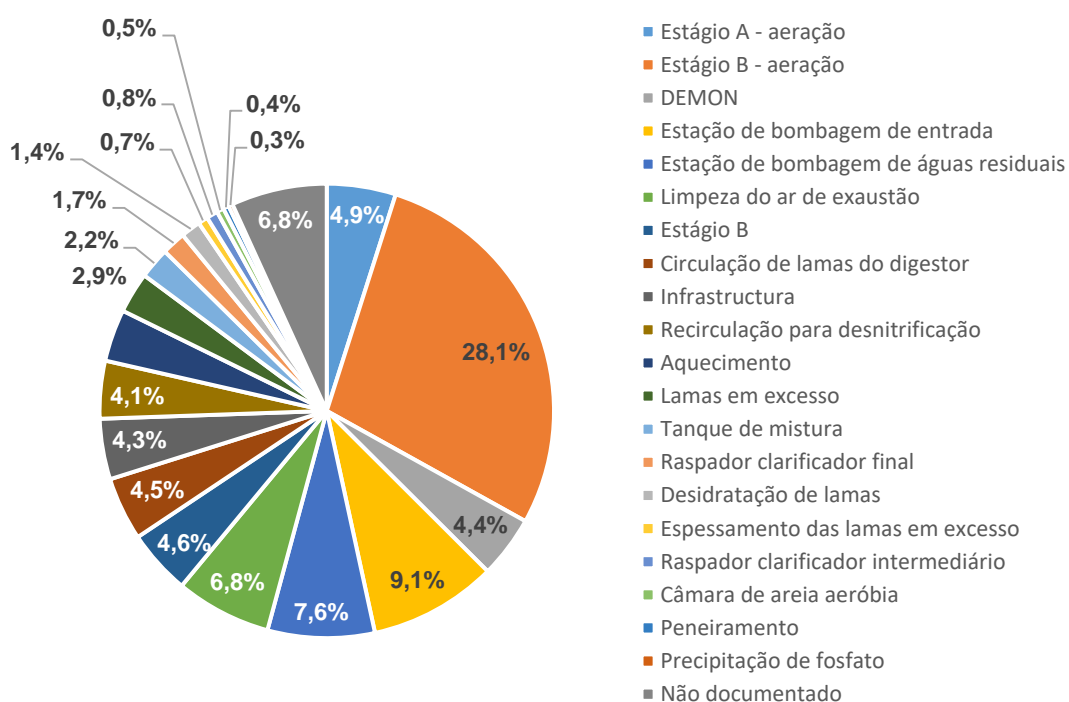


Figura 5.3 – Distribuição dos consumos elétricos na ETAR de Strass im Zillertal (Fonte: Adaptado de Wett *et al.*, 2014 *vide* World Water Works, 2013).

Tendo em conta que foi necessário incluir a etapa dos consumos “Gestão Operacional e Outros” calcularam-se para a ETAR de Strass os IDE I_{TP1} , I_{PRE1} , I_{TP1} , I_{TS1} , I_{TL1} e ainda o seguinte indicador adicional apresentado em seguida. Este indicador foi igualmente calculado para os casos de estudo (equação 5.7).

$$I_{O1} = \frac{E_O}{V_{AR}} \quad (5.7)$$

Onde,

I_{O1} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/m³);

E_O – Energia elétrica anual consumida nas etapas de filtração/desinfecção, cogeração, desodorização, gestão operacional e outros (kWh);

V_{AR} – Volume anual de água residual tratada (m^3).

Posteriormente, para averiguar quais as medidas de eficiência energética mais adequadas e passíveis de serem implementadas nos casos de estudo averiguou-se de entre a lista de equipamentos consumidores de energia elétrica das ETAR (disponível em Marques, 2016) e se existem oportunidades de melhoria. Ressalva-se que foram igualmente tidas em consideração as conclusões obtidas na situação de referência para formulação destas sugestões.

5.2.3. Cenário de produção energética

Neste cenário recorreu-se a uma análise custo-benefício para aferição da viabilidade da implementação de sistemas solares, com base em indicadores de desempenho financeiro. Paralelamente, recorreu-se ao cálculo dos indicadores I_{E1} e I_{E3} apresentados no subcapítulo 5.2.1, de forma a averiguar as melhorias alcançadas. Posto isto, neste cenário os procedimentos dividem-se em dois componentes consoante as etapas de análise: i) Dimensionamento e estimativa da produção energética e ii) Avaliação financeira do projeto.

A seleção da implementação de painéis solares PV teve por base a localização geográfica das ETAR, dispondo assim de um elevado potencial PV, e ainda o facto de se tratar de uma tecnologia já aplicada em instalações semelhantes com resultados comprovados. Esta seleção teve também em conta o facto de que, em oposição a outras FER, a energia solar possui vantagem dada a disponibilidade universal da luz solar e ainda devido à modularidade do sistema permitindo no futuro o aumento da potência instalada.

i) Dimensionamento e estimativa da produção elétrica

A radiação solar disponível num local constitui a informação mais relevante na análise da viabilidade da implementação dos painéis PV, pois a quantidade de energia elétrica produzida anualmente depende consideravelmente da radiação solar incidente no local. Desta forma, procedeu-se a um levantamento de dados sobre as condições de referência de ambos os locais onde as ETAR se inserem com recurso ao programa PVGIS, apresentados na Tabela 5.4.

Selecionou-se a ferramenta PVGIS desenvolvida pela Joint Research Centre (JRC), dado que constitui uma ferramenta *online* e gratuita que permite o cálculo da produção elétrica mensal e anual obtida em sistemas PV com e sem ligação à rede, através da disponibilização de dados sobre a irradiação solar em cada ponto da Europa. Estes dados revelam que as características do local são compatíveis com projetos de implementação de painéis solares PV, pelo que no presente caso, se constata um elevado potencial para aproveitamento de energia solar.

A título de exemplo, é apresentada na Figura 5.4 a irradiação solar média diária por meses do ano, relativamente a um dos casos de estudo, no qual a energia da radiação global incidente

corresponde à área subentendida pela curva. Com recurso à mesma, verifica-se que a produção solar é alcançada nas horas de disponibilidade solar que, em média, se iniciam por volta das 6h00 e terminam perto das 18h00. Comprova-se igualmente que em Agosto é alcançado maior valor de irradiação solar horária por volta das 12h e, por oposição, em Dezembro o menor.

Constata-se que as maiores afluências de cargas orgânicas no período das 9h e as 18h são coincidentes com as horas de maior produção energética dos painéis solares PV pelo que se considera um projeto interessante, sobretudo pelo facto de abranger os horários de ponta e cheia. Desta forma, o suprimento das necessidades energéticas nestes períodos poderá originar uma maior poupança associada.

Tabela 5.4 – Condições de referência dos locais de implementação do projeto obtidos pelo PVGIS.

Coordenadas	ETAR do Seixal				ETAR de Sesimbra			
	38°37'56" N, 9°4'25" O				38°26'6" N, 9°6'53" O			
Meses	H _h	H _{opt}	I _{opt}	T _{24h}	H _h	H _{opt}	I _{opt}	T _{24h}
Janeiro	2230	3720	62	10,5	2310	3860	62	13,0
Fevereiro	3320	4950	55	11,0	3410	5070	55	13,2
Março	4800	5960	42	13,2	5040	6300	42	14,1
Abril	5760	6200	28	15,0	6160	6660	26	14,9
Mai	6830	6590	14	17,6	7210	6960	13	16,5
Junho	7580	6880	5	20,9	7810	7080	5	18,6
Julho	7810	7270	9	22,6	7900	7340	9	19,5
Agosto	7040	7280	21	23,1	7070	7310	21	20,1
Setembro	5500	6610	37	21,3	5630	6780	37	19,6
Outubro	3890	5420	51	17,9	4000	5600	51	18,4
Novembro	2600	4260	61	13,5	2710	4460	61	15,6
Dezembro	2010	3550	65	11,0	2090	3720	65	13,9

Onde,

H_h – Irradiação no plano horizontal (Wh/m³/d);

H_{opt} – Irradiação no plano inclinado ótimo (Wh/m³/d);

I_{opt} – inclinação ótima (°);

T_{24h} – Temperatura média mensal (°C).

No que diz respeito ao dimensionamento do projeto, inicialmente verificaram-se quais as áreas disponíveis para a instalação de painéis, sendo que estas abrangem tanto os telhados das instalações como superfícies do solo. Para a sua obtenção, recorreu-se à utilização da ferramenta *Google maps* de acordo com os critérios: áreas amplas em telhados planos ou na superfície do solo sem obstruções substanciais, grande arborização ou edificações à sua volta de forma a diminuir o efeito do sombreamento.

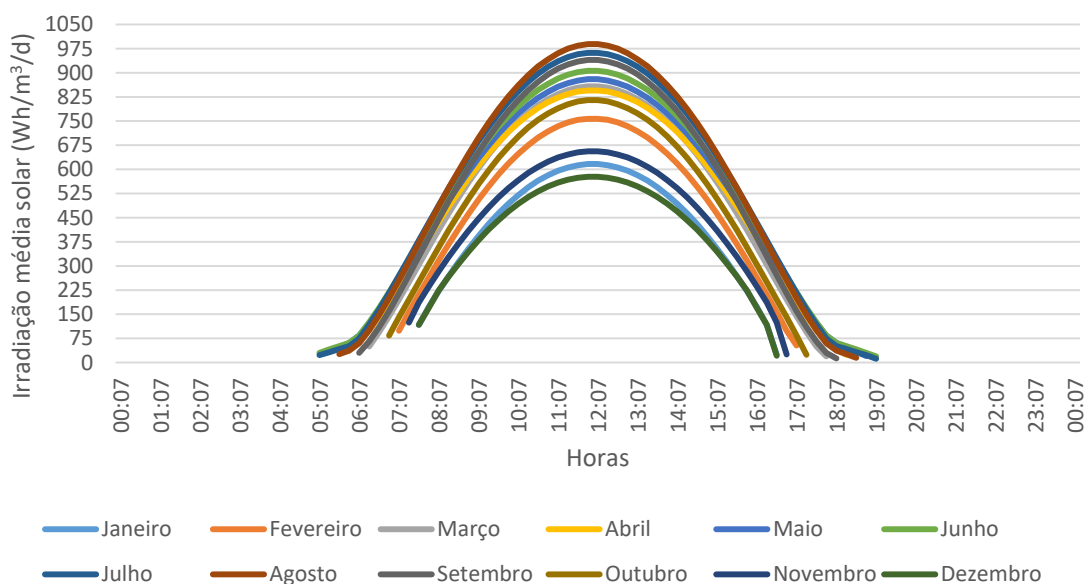


Figura 5.4 – Irradiação solar horária nos diversos meses do ano (Fonte: SolarGis).

Por sua vez, para a estimativa do número de painéis PV a instalar, assumiu-se que a área útil ocupa efetivamente 72,4% da área disponível nos sistemas PV e 74,3% da área disponível dos PV *tracking* (Ong *et al.*, 2013), de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.5. Este valor foi considerado tendo em conta que a restante área é necessária para existir espaço para manutenção dos equipamentos, bem como ao afastamento necessário entre painéis, no caso de serem inclinados, para evitar o sombreamento causado pelos mesmos.

Tabela 5.5 – Requisitos de área necessária por dimensão do projeto fotovoltaico com um sistema PV (Adaptado de Ong *et al.*, 2013).

Sistema	Capacidade instalada (MW)	Área útil (ha)	Área disponível (ha)
Fixo	< 20	2,2	3,0
	> 20	2,4	3,0
Tracking 1 eixo	< 20	2,6	3,5
	> 20	3,6	3,4

Selecionou-se um sistema para autoconsumo, sendo assim orientado para o consumo instantâneo e nos casos em que a produção não corresponda às necessidades permite ao consumidor colmatá-las com recurso à energia elétrica proveniente da rede. Desta forma, não foi considerada a implementação de um sistema de armazenamento por baterias.

Foram analisados dois tipos de sistemas a implementar: sistema PV fixo com células c-Si e Sistema PV *tracking* horizontal de 1 eixo com células c-Si, denominados sistema A e sistema B, respetivamente. Consideraram-se células com uma eficiência de 15,4%, e área unitária de 1,8 m², inversor STP 25000TL-30 c/ DST, contador e *modem* e material elétricos. Nos casos em que as áreas selecionadas dizem respeito a telhados acresce a necessidade de implementação de um *kit* fixação e suporte. A análise de dois tipos de sistemas visou analisar as produções

alcançadas e assim selecionar a formulação que permite uma potencialização da produção energética, *i.e.* identificar qual a solução mais custo-eficaz.

Relativamente aos custos de investimento considerou-se um custo de 1 620 €/kWh relativamente ao sistema B de acordo com Taylor *et al.*, (2015). Segundo Feldman *et al.*, (2014) o custo de um sistema PV fixo com células c-Si é de cerca de 2,80 €/Wh e um sistema PV *tracking* com células c-Si é de 2,94 €/Wh, pelo que considerando esta diferença de aproximadamente 5% nos custos dos sistemas adota-se um custo do sistema A de 1 539 €/kWh. Note-se que custos englobam todo o sistema, incluindo as componentes referidas anteriormente. No caso em que se selecionaram áreas úteis em telhados considerou-se que o custo acresce em 25 000€.

Os painéis selecionados possuem 10 anos de garantia do produto e 12 anos de garantia de uma potência nominal de 90% e 25 anos de garantia para uma potência nominal de 80% (CCBS Energia, 2016). A seleção deste tipo de células baseou-se no facto de ser a tecnologia mais utilizada mundialmente e possuir uma eficiência elevada em relação aos outros sistemas analisados.

A potência de pico representa a potência que o painel atinge a condições *standart* (STC), a uma temperatura de 25°C e com uma radiância de 1000 W/m² do painel. Assim, foi calculada com recurso aos dados da área unitária dos painéis e a sua eficiência de acordo com a equação 5.8 (Europe Solar DE, 2016):

$$P = E \times (r \times A_{\text{painel}}) \quad (5.8)$$

Onde,

P – Potência (Wp);

E – Eficiência do painel (%);

r – Radiância do painel (1000 W/m²);

A_{painel} – Área do painel (m²).

Por sua vez, o número de módulos utilizados foi obtido com recurso à equação 5.9:

$$N^{\circ} \text{ módulos} = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{painel}}} \quad (5.9)$$

Onde,

$A_{\text{útil}}$ – Área em que é possível instalar os módulos (m²);

A_{painel} – Área do painel (m²).

ii) Análise da viabilidade financeira

Neste cenário o projeto de investimento em causa centra-se na implementação de painéis solares PV nas ETAR do Seixal e Sesimbra, em 2017 e com início de exploração no mesmo ano. Recorreu-se a uma análise de viabilidade financeira, dado que constitui uma ferramenta de suporte de decisão importante sobre a implementação do sistema PV. Procedeu-se à elaboração de um balanço entre as estimativas das receitas e dos custos, tendo sido os dados trabalhados

numa folha de cálculo em *Excel*, considerando um período de operacionalidade de 15 anos, ainda que os equipamentos a instalar possam ter um tempo médio de vida superior, nomeadamente os painéis solares PV com um tempo útil de vida de cerca de 25 anos.

Os cálculos tiveram em conta os seguintes pressupostos: i) os gastos com os custos anuais de exploração dos sistemas solares PV dizem respeito a 0,17% do custo de investimento total, de acordo com Dervishi *et al.* (s.d); ii) uma taxa de atualização de 5% tendo em conta que os custos são variáveis ao longo do tempo; iii) um custo inicial de eletricidade de 0,12€/kWh respeitante à média ponderada entre os horários coincidentes com a produção de energia solar (ponta e cheia); iv) uma taxa de atualização dos preços de eletricidade de 2,5% em linha com a taxa de atualização de 2016 face a 2015 (Expresso, 2016); v) nos primeiros 12 anos a potência dos painéis é de 90% e até ao 25º ano a potência é de 80%; vi) 10% de perdas totais do sistema; vii) substituição do inversor ao fim de 12 anos. Em seguida são apresentadas as diferentes parcelas constituintes da análise custo-benefício do projeto, bem como as respetivas fórmulas de cálculo.

Receitas de exploração

Durante o seu período de vida útil, o projeto gera fluxos financeiros decorrentes da exploração da atividade relacionada com o projeto. Assim, as receitas de exploração, tendo em conta que a produção elétrica se destina a autoconsumo, prendem-se com as receitas referentes à diferença entre os custos energéticos atuais e após implementação dos projetos, segundo a equação (5.10).

$$R (\text{€}) = CT_i - CT_p \quad (5.10)$$

Onde,

R – Receitas de Exploração (€);

CT_i – Custos energéticos totais (€);

CT_p – Custos energéticos após implementação dos projetos (€).

Custos de exploração

Estes custos englobam todos os custos necessários para o correto funcionamento do projeto, como os custos de manutenções e contratações de pessoal, sendo calculado com recurso à equação (5.11).

$$CE (\text{€}) = C_M + C_P \quad (5.11)$$

Onde,

CE – Custos de exploração (€);

C_M – Custos com manutenção dos equipamentos (€);

C_P – Custos com o pessoal (€).

Custos de investimento

Estes custos abrangem todos os custos ligados à aquisição dos equipamentos necessários ao funcionamento do sistema, calculado com recurso à equação (5.12). De ressaltar que dado que

a produção é insuficiente para suprir as necessidades globais da estação não existe a necessidade de integrar baterias no sistema.

$$CI (\text{€}) = \sum_{i=0}^N C_{Ei} \quad (5.12)$$

Onde,

CI – Custos de investimento (€);

C_{Ei} – Custos de aquisição do equipamento i .

Indicadores de desempenho financeiro:

Como métodos de avaliação financeira que permitem determinar a rentabilidade financeira dos projetos e que servem de apoio à tomada de decisão do melhor projeto utilizaram-se os seguintes:

Valor atual líquido (VAL)

Este indicador diz respeito às somas das despesas, investimento e receitas geradas com o projeto descontadas pelo custo de capital, podendo ser obtida através da equação 5.13. No presente trabalho recorreu-se à função NPV (*Net Present Value*) do *software* Microsoft Excel 2013 para o seu cálculo (Soares *et al.*, 1999).

$$VAL (\text{€}) = \sum_{t=0}^N \frac{-CI}{(1+i)^t} + \left(\sum_{t=1}^N \frac{R}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^N \frac{CE}{(1+i)^t} \right) + \frac{V_R}{(1+i)^N} \quad (5.13)$$

Em que:

VAL – Valor atual líquido do projeto (€);

CI – Custos de investimento (€);

R – Receitas de exploração (€);

CE – Custos de exploração e manutenção do projeto (€);

V_R – Valor residual dos equipamentos essenciais para o projeto no seu período de vida útil (€);

i – taxa de atualização considerada para a análise do projeto (%);

N – Período de vida útil do projeto (anos).

A análise de viabilidade económica com base no VAL é realizada do seguinte modo (Tabela 5.6), sendo que o projeto deverá ser selecionado caso a VAL obtida apresente um valor superior a 0, o que indica que o projeto não só cobre as despesas como é gerador de receitas.

Tabela 5.6 – Critérios de seleção com base no VAL.

Indicador	Critério	Descrição da taxa de retorno
VAL > 0	Aceitar o projeto	Superior à exigida
VAL = 0	Aceitar o projeto	Igual à exigida
VAL < 0	Rejeitar o projeto	Inferior à exigida

Taxa interna de rentabilidade (TIR)

Este indicador largamente utilizado em avaliações de projetos, corresponde à taxa de atualização que anula o Valor Anual Líquido (VAL). O seu cálculo é efetuado por uma série de iterações de acordo com a equação 5.14, sendo um projeto tão mais interessante quanto maior for a TIR. Para este estudo, a taxa interna de rentabilidade foi conseguida através da função IRR do *software* Excel 2013. Na avaliação de um projeto isolado, como o presente, a decisão de proceder com a implementação deve ser tomada caso a TIR obtida seja superior à taxa de atualização (i) considerada para a avaliação (Soares *et al.*, 1999).

$$0 = \sum_{t=0}^N \frac{-CI}{(1 + TIR)^t} + \left(\sum_{t=1}^N \frac{R}{(1 + TIR)^t} - \sum_{t=1}^N \frac{CE}{(1 + TIR)^t} \right) + \frac{V_R}{(1 + TIR)^N} \quad (5.14)$$

Onde:

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade (%);

CI – Custo de investimento (€);

R – Receitas de exploração (€);

CE – Custos de exploração e manutenção do projeto (€);

V_R – Valor residual dos equipamentos essenciais para o projeto no seu período de vida útil (€);

N – Período de vida útil do projeto (anos).

Tempo de recuperação do capital (TRC)

Constitui um indicador de atratividade do investimento que diz respeito ao tempo mínimo de funcionamento do projeto, para que as somas dos fluxos de receitas e custos igualem as despesas de investimento. Permite comparar projetos com períodos de vida útil diferentes, tendo como critério de seleção o menor tempo de recuperação possível. Assim, para que um projeto seja viável, o tempo de recuperação do capital deve ser inferior ao período de vida útil do mesmo (Brealey *et al.*, 2011).

Em paralelo a ambas as componentes apresentadas calcularam-se os indicadores *I_{E1}* e *I_{E3}*, após implementação do projeto de forma a apurar a autossuficiência energética alcançada, assim como verificar a utilização de energia a partir de fontes externas e comparar os valores com os verificados na Situação de Referência.

6. Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na análise dos cenários de consumos energéticos das ETAR do Seixal e de Sesimbra e efetuada a respetiva discussão.

6.1. ETAR do Seixal

6.1.1. Situação de Referência

O consumo médio mensal de energia elétrica foi determinado a partir das faturas de energia do período de janeiro de 2013 até janeiro de 2014 apresentadas em Marques (2016), cujos se encontram apresentados na Figura 5.1. De acordo com a mesma, comprova-se que a distribuição dos consumos pelos horários em 2014 foi a seguinte: 11% em horário de ponta, 44% em cheia, 29% no vazio e 15% no supervazio.

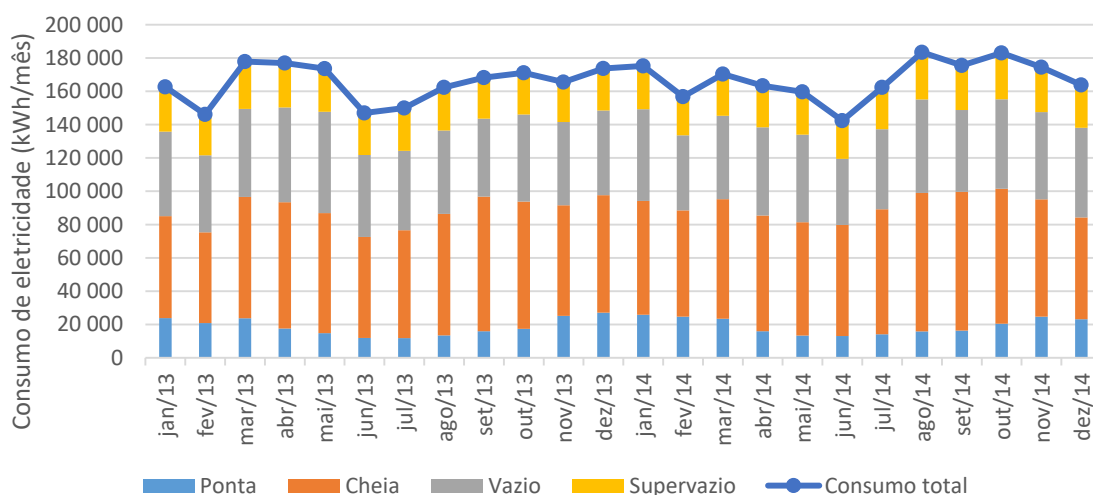


Figura 6.1 – Consumo de eletricidade de janeiro de 2013 a dezembro de 2014 distribuídos pelos períodos horários (Adaptado de: Marques, 2016).

A Tabela 6.1 apresenta os volumes de água residual tratados, assim como os custos associados aos consumos de energia elétrica. No ano de 2014, a ETAR do Seixal apresentou um consumo energético anual de 2 010 175 kWh/ano, equivalendo a uns custos totais de aproximadamente 193 395 €. Por outro lado, a média de consumo mensal foi de aproximadamente de 164 852 kWh em 2013 e 167 515 kWh em 2014, sendo que o consumo mais acentuado em 2013 se verificou entre os meses de Março a Maio e em 2014 entre Agosto a Outubro.











Tabela 6.1 – Dados do volume afluente médio diário, dos sistemas de recuperação/produção energética implementados e consumos da ETAR do Seixal.




Ano	Volume médio diário (m ³ /dia)	Sistemas de recuperação/produção de energia implementados	Consumo de eletricidade (kWh/mês)	Consumo de eletricidade (kWh/ano)	Custos de eletricidade (€/ano)
2013	13 340	Codigestão; Painéis	164 582	1 974 988	143 173*
2014	12 267	solares térmicos	167 515	2 010 175	193 395*

* Estimativas realizadas no âmbito da presente dissertação

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos relativos aos IDE selecionados para o estudo. Pela análise do indicador I_{G1} , constata-se que o desempenho no que diz respeito à energia elétrica consumida por volume de efluente tratado piorou, passando de 0,41 kWh/m³ em 2013 a 0,45 kWh/m³ em 2014. De acordo com a metodologia seguida, os valores obtidos indicam que o desempenho energético da ETAR é considerado aceitável em 2013 e não aceitável em 2014. No entanto, ressalva-se que este indicador por si não é indicativo do real desempenho energético, sendo possível constatar, por outro lado, que o consumo específico de eletricidade respeitante à quantidade de CBO₅ removida se manteve num nível de bom desempenho, apesar do acréscimo em 2014 face a 2013 (1,05 kWh/kg CBO₅ rem. em 2013 e 1,56 kWh/kg CBO₅ rem. em 2014).

Tabela 6.2 – Indicadores para a ETAR do Seixal em 2013 e 2014.

Indicadores de desempenho	2013	2014
I_{G1} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/m ³)	 0,41	 0,45
I_{G2} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/kg CBO ₅ removido)	 1,05	 1,56
I_{G3} – Consumo específico de energia elétrica por habitante equivalente (kWh/(PE.ano))	 23,08	 34,04
I_{G4} – Adequabilidade da capacidade da ETAR (%)	50	46
I_{PRE1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento preliminar (kWh/m ³)*	0,05	0,07
I_{TP1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento primário (kWh/m ³)*	0,003	0,003
I_{TS1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento secundário (kWh/m ³)*	0,21	0,26
I_{FD1} – Consumo específico de energia elétrica na filtração/desinfecção (kWh/m ³)*	0,002	0,002
I_{TL1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de lamas (kWh/m ³)*	0,05	0,06
I_{TO1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de odores (kWh/m ³)*	0,05	0,06
I_{E1} – Autossuficiência energética (%)	4,68	0,44
I_{E2} – Produção de energia elétrica por biogás (kWh/m ³)*	 0,019	 0,001
I_{E3} – Utilização de energia elétrica a partir de fontes externas (kWh/m ³)*	 0,39	 0,45
I_{OT1} – Custos com energia elétrica por volume tratado (€/m ³)*	0,03	0,04

 Bom desempenho  Desempenho aceitável  Desempenho não aceitável

* Estimativas realizadas no âmbito da presente dissertação

No ano de 2013 o consumo de eletricidade específico por PE (indicador I_{G3}) alcançou o valor-alvo de 23 kWh/(PE.ano), tendo-se obtido um consumo de 23,08 kWh/(PE.ano). Por outro lado, no ano seguinte o desempenho piorou equivalendo a um consumo de 34 kWh/(PE.ano). Os aumentos relativos aos consumos elétrico específicos (indicadores I_{G1} a I_{G4}) em 2014 deverão justificar-se em parte por ter ocorrido uma menor afluência de carga orgânica à ETAR do Seixal, o que terá induzido a necessidade de trabalhar a capacidades de utilização inferiores. Registe-se que neste ano, entre outras situações, ocorreram várias ações de vandalismo nas estações elevatórias do subsistema, que obrigaram ao funcionamento de algumas infraestruturas a gerador de emergência, durante algumas semanas enquanto se procedeu à reparação dos danos provocados às instalações.

O indicador I_{G4} , deverá ser calculado com base nos dados diários, o que não é possível de ser efetuado. Com recurso à Figura 6.2, comprova-se que em 2013 se registou um volume médio diário, calculado com base nos volumes mensais, de 13 157 m³/d e em 2014 de 12 267 m³/d. A análise realizada não assegurou o cálculo dos caudais diários, pelo que não é possível avaliar corretamente o indicador I_{G4} , contudo é possível afirmar que a ETAR não se encontra próxima da sua capacidade máxima. Independentemente da ETAR possuir várias linhas de tratamento paralelas, este facto pode induzir a um acréscimo de consumo específico, nomeadamente na etapa de tratamento secundário no reator biológico.

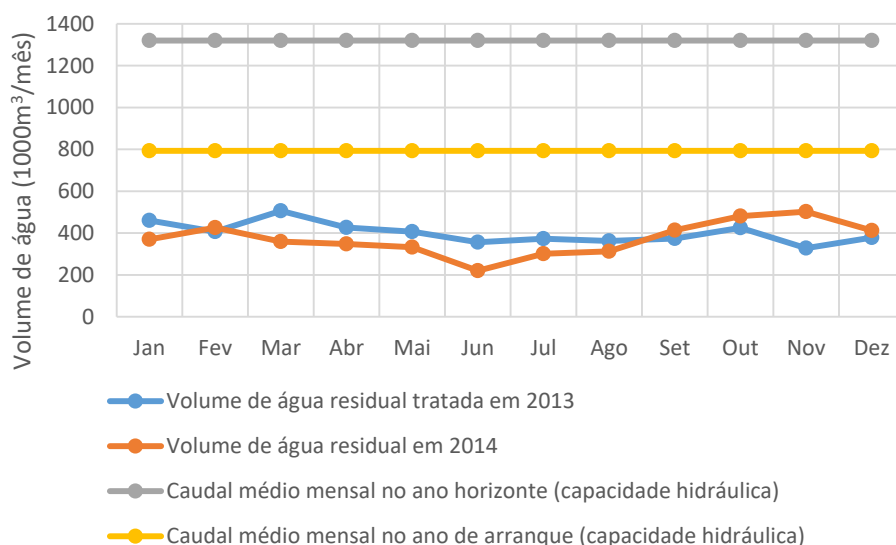


Figura 6.2 – Volume mensal de água tratada em 2013 e 2014 e caudais médios diários de dimensionamento.

No que diz respeito às etapas de tratamento comprova-se que o tratamento secundário é o mais exigente a nível de energia elétrica requerida, apresentando um consumo energético específico de 0,34 kWh/m³. Os maiores contribuidores nesta fase dizem respeito aos quatro sobrepressores ligados ao reator biológico, com potências nominais individuais de 75 kW e contribuições de 94% e 87% nos consumos em 2013 e 2014 respeitantes a esta etapa, respetivamente. O funcionamento destes equipamentos são controlados através de sondas de oxigénio, permitindo manter estes valores o mais baixo possível.

Em seguida, a etapa com maior consumo associado diz respeito ao tratamento preliminar, sobretudo devido à bombagem, nomeadamente pelas bombas submersíveis com potências nominais unitárias de 32,8 kW. Segue-se a etapa do tratamento de lamas, com um consumo energético específico de 0,08 kWh/m³ em 2014. Os equipamentos mais consumidores nesta fase dizem respeito à centrífuga de potência nominal de 44,5 kW. Por outro lado, as etapas de filtração/desinfeção e tratamento primário apresentam consumos elétricos específicos relativamente baixos, apenas 1% do total.

Por fim, relativamente aos custos associados com os consumos elétricos (indicador I_{OT1}) é possível constatar que houve um acréscimo em 2014 face a 2013, tendo em conta o aumento dos consumos no mesmo período. Verifica-se ainda que os consumos associados ao horário do

vazio e supervazio diminuíram, aumentando nos horários de ponta e cheia, onde por sua vez a tarifa é mais dispendiosa. Estes valores podem ser comprovados com recurso à Figura 5.1.

A etapa de desodorização representa um consumo considerável tendo em conta aos problemas de operação previamente explicitados (0,05 kWh/m³ em 2013 e 0,06 kWh/m³ em 2014). Por outro lado, a produção anual de eletricidade por biogás diminuiu de 0,019 kWh/m³ para 0,001 kWh/m³ em 2014, o que de acordo com os valores de referência indica um desempenho não aceitável. Assim sendo o nível de autossuficiência em 2014 revelou-se inferior a 1%, induzindo à necessidade de consumo energético por fontes externas de 0,45 kWh/m³, equivalente a um desempenho novamente não aceitável.

As regressões lineares estabelecidas entre os consumos de eletricidade e outras variáveis de influência nas ETAR encontram-se apresentadas graficamente na Figura 6.3. Os baixos valores do R² indicam que existe uma fraca correlação linear entre os consumos elétricos e os volumes de água residual tratados (R²=0,1794 em 2013 e R²=0,3175 em 2014), bem como entre os consumos elétricos e a carga orgânica no efluente (R² = 0,0004 em 2013 e R²=0,3801 em 2014) e ainda entre os consumos elétricos e a PE servida (R² = 0,0033 em 2013 e R²=0,3248 em 2014). Estas conclusões encontram-se em linha com os resultados evidenciados pelas auditorias energéticas e poderão dever-se ao facto da instalação se encontrar a operar bastante abaixo da sua capacidade máxima, conforme foi verificado com recurso ao indicador I₆₄ e pela Figura 6.2.

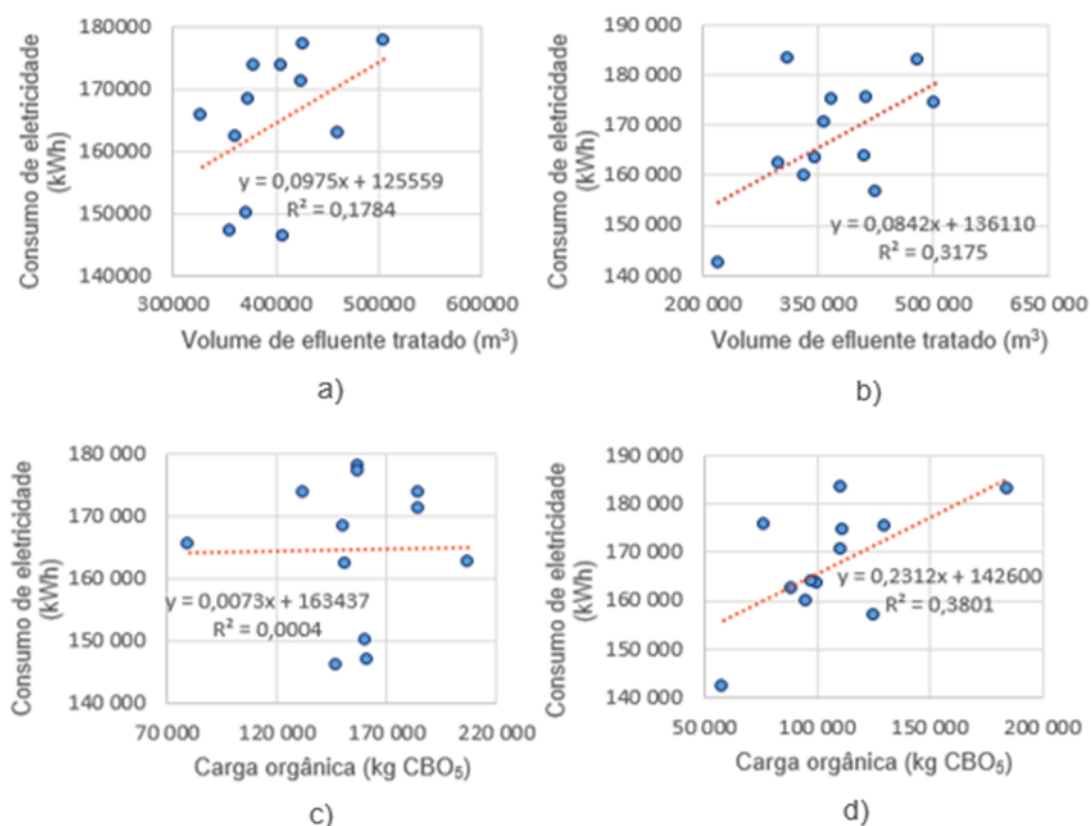


Figura 6.3 - Relação entre o consumo de eletricidade e i) valores de efluente em 2013(a) e em 2014(b), ii) carga orgânica em 2013(c) e 2014(d); iii) PE em 2013(e) e 2014(f), na ETAR do Seixal.

(continua)

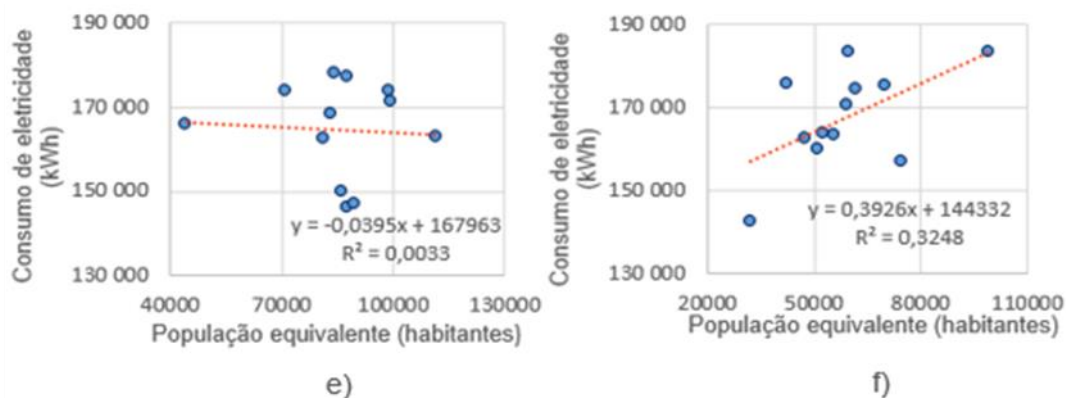


Figura 6.3 – Relação entre o consumo de eletricidade e i) valores de efluente em 2013(a) e em 2014(b), ii) carga orgânica em 2013(c) e 2014(d); iii) PE em 2013(e) e 2014(f), na ETAR do Seixal (continuação).

6.1.1. Análise dos consumos de eletricidade

Neste capítulo são analisadas as ETAR de Strass im Zillertal, com um consumo específico de energia elétrica de 0,35 kWh/m³, e a ETAR do Seixal, com um consumo específico de energia elétrica de 0,45 kWh/m³. Ambas as ETAR operam num sistema de lamas ativadas, porém a ETAR de Strass possui um sistema dividido em dois estágios, um primeiro de lamas ativadas em alta carga e um segundo de lamas ativadas em baixa carga. Por oposição, a ETAR do Seixal opera num sistema de lamas ativadas em média carga.

Importa, no entanto, ressaltar novamente que esta análise efetuada neste capítulo que relaciona a ETAR do Seixal com a ETAR de Strass im Zillertal é somente a título exemplificativo de forma a apresentar um caso que serve de exemplo para demonstrar um caso referência de gestão dos consumos energéticos em ETAR. Adicionalmente, o facto da ETAR do Seixal estar exposta ao problema das intrusões salinas que afetam caudais de chegada e a viabilidade do tratamento secundário e do tratamento de lamas no caso da ETAR do Seixal é necessário ser ter tido em conta na análise dos resultados obtidos sobre o seu desempenho energético.

A Tabela 6.3 apresenta os requisitos legais de descarga de efluentes na Áustria e em Portugal. De acordo com a mesma constata-se que a Áustria possui requisitos mais restritos face aos nacionais, fazendo com que a ETAR de Strass im Zillertal necessite, à partida, de uma maior quantidade de energia elétrica nos seus processos de tratamento de efluentes de forma a torná-los adequados à receção pelo meio receptor.

Tabela 6.3 – Requisitos legais de descarga de efluentes na Áustria e em Portugal (Fonte: AEVKA, 1996 *vide* Jonasson, 2007; Decreto-Lei n° 152/97).

Parâmetro	Áustria		Portugal	
	Concentração (mg/l)	Percentagem mínima de remoção (%)	Concentração (mg/l)	Percentagem mínima de remoção (%)
CBO₅ (a 20°C)	15	-	25	70-90
CQO	75	-	125	75

A concentração do efluente possui igualmente impacto nos consumos energéticos associados, sendo apresentados em seguida, na Tabela 6.4, as características das águas residuais à entrada da estação de ambos os casos. De ressaltar que os valores considerados para a Áustria dizem respeito a valores médios encontrados no país e não são específicos da ETAR de Strass. Verifica-se que o efluente na ETAR do Seixal possui uma maior concentração de carga orgânica sendo necessária, à partida, uma maior quantidade de energia elétrica para o seu tratamento face à ETAR de Strass im Zillertal.

Tabela 6.4 – Características dos efluentes austríacos e os da ETAR do Seixal (Fonte: Jonasson, 2007; SIMARSUL *vide* Serrano, 2014; AdLVT, 2016).

Parâmetro	Áustria	Seixal
Caudal afluyente (l/PE)	210	208
CBO ₅ (mg/l)	291	340
CQO (mg/l)	547	605

A título exemplificativo são em seguida apresentados, na Tabela 6.5, os IDE respeitantes à ETAR do Seixal e de Strass im Zillertal. É possível constatar que a ETAR de Strass apresenta um consumo referente ao tratamento secundário relativamente baixo tendo em conta todos os esforços que tem vindo a efetuar no sentido do tratamento se adaptar às necessidades da população servida, sobretudo pelo facto da existência de sazonalidade.

Tabela 6.5 – IDE referentes às ETAR do Seixal e Strass im Zillertal.

Indicador	ETAR SSX**	ETAR de Strass**
I _{PRE1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento preliminar (kWh/m ³)*	0,065	0,070
I _{TP1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento primário (kWh/m ³)*	0,003	n.a.
I _{TS1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento secundário (kWh/m ³)*	0,255	0,155
I _{TL1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de lamas (kWh/m ³)*	0,058	0,061
I _{O1} – Consumo específico de energia elétrica com Outros (kWh/m ³)*	0,069	0,064
I _{G1} – Consumo energético da ETAR (kWh/m ³)*	0,45	0,35

* Estimativas realizadas no âmbito da presente dissertação

** Ressalva-se que as ETAR não são diretamente comparáveis, os dados apresentados servem somente para demonstrar a possibilidade de alcançar níveis de eficiência energética desta natureza em outras ETAR.
n.a. – não aplicável.

A ETAR do Seixal possui um completo sistema de aquisição de dados que permite um controlo mais eficaz dos equipamentos e, conseqüentemente, uma melhor gestão dos consumos de energia da estação. A ETAR dispõe ainda de VFD, sensores de OD, difusores de bolha-fina, bombas e motores eficientes, pelo que não se considera oportuna a integração de outros equipamentos revelando-se a ETAR bem equipada neste sentido. Por outro lado, como medida de melhoria de eficiência energética a continuação da investigação e resolução dos problemas de entrada de água salina, que permitirá não só otimizar a produção de energia por cogeração, como as etapas de tratamento secundário e de lamas o que, por sua vez, permitirá uma redução dos consumos energéticos atuais da ETAR.

6.1.2. Cenário de produção energética

Neste cenário pretendeu-se avaliar a viabilidade financeira da instalação de uma unidade de produção para autoconsumo (UPAC), visando a análise de dois sistemas solares PV: sistema A, sistema PV fixo com células c-Si e Sistema B, sistema PV *tracking* horizontal de 1 eixo com células c-Si. No caso do sistema A avaliou-se a implementação de um sistema com uma potência instalada de 273,9 kWp e no caso do sistema B de 281,2 kWp, correspondendo à superfície útil do solo das instalações no Seixal. Nas Tabelas 6.6 e 6.7 são apresentados os dados referentes às áreas disponíveis selecionadas dentro dos limites das instalações da ETAR do Seixal, as quais se encontram apresentadas na Figura 6.4. O somatório destas áreas totaliza aproximadamente 1 473 m².



Figura 6.4 – Áreas disponíveis para implementação de painéis solares PV na ETAR do Seixal.

Tabela 6.6 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema A.

Área (nº)	1	2	3	Total
Área disponível de solo (m ²)	875	500	1 080	2 455
Área útil (m ²)	634	364	782	1 780
Módulos instalados (nº)	352	202	434	988
Potência instalada (kWp)	97,6	56,0	120,3	273,9
Produção estimada anual do sistema A (kWh)	159 000	91 100	196 000	446 100

Tabela 6.7 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema B.

Área (nº)	1	2	3	Total
Área disponível de solo (m ²)	875	500	1 080	2 455
Área útil (m ²)	650	372	802	1 824
Módulos instalados (nº)	361	207	446	1 014
Potência instalada (kWp)	100,1	57,4	123,7	281,2
Produção estimada anual do sistema B (kWh)	221 000	127 000	273 000	621 000

Com recurso à Figura 6.5 é possível verificar a quantidade de eletricidade produzida com recurso ao aproveitamento PV pelos sistemas A e B face às necessidades globais da ETAR. Comprova-se que os meses com maior produção fotovoltaica dizem respeito aos meses de verão, dado que apresentam uma disponibilidade solar diária superior. A produção referente ao sistema A permite suprir cerca de 22% dos consumos totais anuais e, por outro lado, o sistema permite suprir aproximadamente 31%. Um dos grandes problemas das ETAR é a grande variação instantânea das necessidades de energia elétrica, resultando facilmente que os sistemas de produção ultrapassem as necessidades instantâneas. Na Figura é ainda apresentado o nível de autossuficiência alcançado, cujos valores traduzem o quociente entre a produção e o consumo mensal.

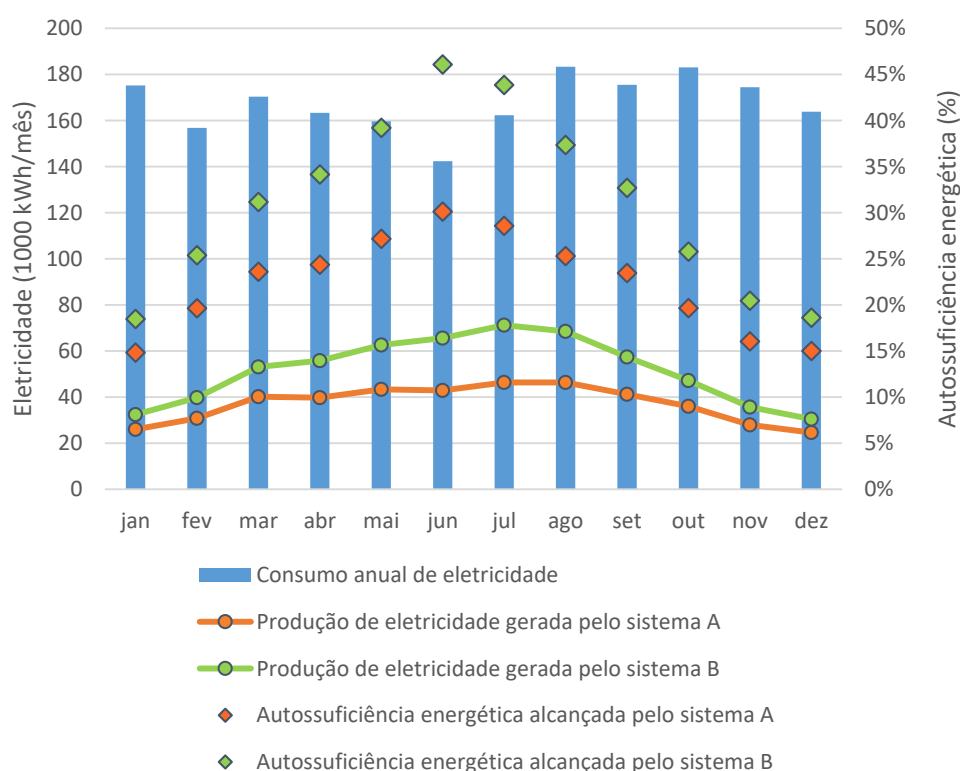


Figura 6.5 – Produção de eletricidade pelos sistemas A e B face ao cenário global na ETAR do Seixal.

Este projeto revela-se viável para ambas as soluções de instalação de sistemas PV. Esta conclusão é baseada nos resultados dos indicadores financeiros, dispostos na Tabela 6.8. O valor obtido respeitante ao VAL do sistema A indica que o projeto é viável e que, além disso, gera um lucro adicional de 54 520€. Por outro lado, no que diz respeito ao sistema B obteve-se um VAL superior de 649 817€, o que indica que se trata de um projeto mais aliciente. Também no que diz respeito ao TRC se verifica a viabilidade dado que o valor obtido é inferior ao tempo de vida útil dos módulos solares o que evidencia a sua viabilidade, sendo evidenciado que o sistema B permite uma recuperação do capital em menos tempo pelo que demonstra ser mais aliciente.

Além disto, com a implementação do projeto dos sistemas PV fixos é ainda possível alcançar uma poupança anual de cerca de 42 919€ em custos com a eletricidade adquirida à rede com o sistema A e 59 746€ com o sistema B. Posto isto é possível constatar que a solução custo-eficaz a implementar será o sistema B.

Tabela 6.8 – Resultados da implementação do projeto

Sistema	CI (€)	CE (€)	R (€)	VAL (€)	TIR (%)	TRC (anos)
A	421 532	20 063	986 711	54 520	7,1	9
B	455 544	21 684	3 022 334	649 817	16,2%	7

A Tabela 6.9 apresenta os resultados dos IDE alcançados após implementação do projeto de aproveitamento solar na ETAR do Seixal. A produção de eletricidade pelos sistemas em análise permite alcançar uma autossuficiência significativamente superior à alcançada atualmente na ETAR, sendo superior em 21,8 p.p. no caso da implementação do sistema A e 30,5 p.p. no que diz respeito ao sistema B face à atual. Consequentemente é ainda possível comprovar que a adoção de ambos os sistemas permite alcançar valores que indicam um desempenho aceitável respeitantes à utilização de energia a partir de fontes externas, o que se revela uma melhoria face à situação de referência onde o desempenho obtido foi não aceitável.

Tabela 6.9 – IDE pós-implementação do sistema solar PV na ETAR do Seixal.

Indicadores de desempenho	Sistema A	Sistema B	2014
I _{E1} – Autossuficiência energética (%)*	22,2	30,9	0,4
I _{E5} – Utilização de energia elétrica a partir de fontes externas (kWh/m ³)*	■ 0,35	■ 0,31	■ 0,45

■ Bom desempenho ■ Desempenho aceitável ■ Desempenho não aceitável

*Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

6.2. ETAR de Sesimbra

6.2.1. Situação de Referência

A Tabela 6.10 apresenta os dados gerais relativamente ao caudal médio afluyente diário, sistemas energéticos instalados e ainda os consumos de eletricidade e respetivos custos. Verifica-se que existiu um acréscimo do consumo energético em 2014 face a 2013 em 3% e uma diminuição proporcional de 3% no volume médio diário de afluyente à ETAR. No entanto, este aumento do consumo de energia deverá estar relacionado com o facto de que, no ano de 2014, ter ocorrido beneficiação dos biofiltros (Marques, 2016). Os consumos em 2014 correspondem a um encargo financeiro anual de cerca de 83 375€. Note-se que os custos com a energia elétrica nas ETAR foram calculados com base no preço médio de 0,105€.


Tabela 6.10 – Dados do volume afluente médio diário, dos sistemas de recuperação/produção energética implementados e consumos da ETAR do Sesimbra.




Ano	Volume médio diário (m ³ /dia)	Sistemas de recuperação/produção de energia implementados	Consumo energético (kWh/ano)	Custos energéticos (€/ano)
2013	2 732	Cogeração	767 829	80 622*
2014	2 653		794 043	83 375*

*Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

A Tabela 6.11 apresenta os resultados dos IDE selecionados para o estudo e pela sua análise verifica-se que de forma geral, os resultados indicam que o desempenho em termos energéticos da ETAR piorou no ano de 2014 face a 2013 (indicadores I_{G1}, I_{G2}, e I_{G3}). Pela análise do resultado do indicador I_{G2} verifica-se que a ETAR apresenta um desempenho aceitável em 2013 e 2014, o que indica a existência de oportunidades de melhoria a nível energético.

Tabela 6.11 – Indicadores para a ETAR de Sesimbra em 2013 e 2014.

Indicador	2013	2014
I _{G1} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/m ³)	0,77	0,82
I _{G2} – Consumo específico de energia elétrica (kWh/kg CBO ₅ removido)	 2,00	 2,74
I _{G3} – Consumo específico de energia elétrica por habitante equivalente (kWh/(PE.ano))	43,90	48,83
I _{G4} – Adequabilidade da capacidade da ETAR (%)*	46	44
I _{PRE1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento preliminar (kWh/m ³)*	0,15	0,15
I _{TP1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento primário (kWh/m ³)*	0,01	0,01
I _{TS1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento secundário (kWh/m ³)*	0,49	0,53
I _{FD1} – Consumo específico de energia elétrica na filtração/desinfecção (kWh/m ³)*	0,00	0,00
I _{TL1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de lamas (kWh/m ³)*	0,07	0,06
I _{TO1} – Consumo específico de energia elétrica no tratamento de odores (kWh/m ³)*	0,04	0,05
I _{E1} – Autossuficiência energética (%)*	7,17	n.d.
I _{E2} – Produção de energia elétrica por biogás (kWh/m ³)*	 0,06	 n.d.
I _{E3} – Utilização de energia elétrica a partir de fontes externas (kWh/m ³)*	0,85	n.d.
I _{OT1} – Custos com energia elétrica por volume tratado (€/m ³)*	0,08	0,09

 Bom desempenho  Desempenho aceitável  Desempenho não aceitável

*Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

Também relativamente à ETAR de Sesimbra não foram analisados os caudais de ponta diários, pelo que não é possível avaliar de forma conclusiva o Indicador I_{G4}. Nesta estação, tal como apresentado na Figura 6.6, o volume médio diário, calculado com base nos volumes mensais, mantém-se abaixo da capacidade instalada, sendo que em 2013 registou-se um volume médio diário de 2 732 m³/d e em 2014 de 2 653 m³/d contrastando com uma capacidade instalada máxima de 6 000 m³/d. De ressaltar ainda que, devido a insuficiência de dados, o volume afluente à ETAR no mês de dezembro foi estimado a partir dos restantes valores mensais resultando na média dos mesmos.

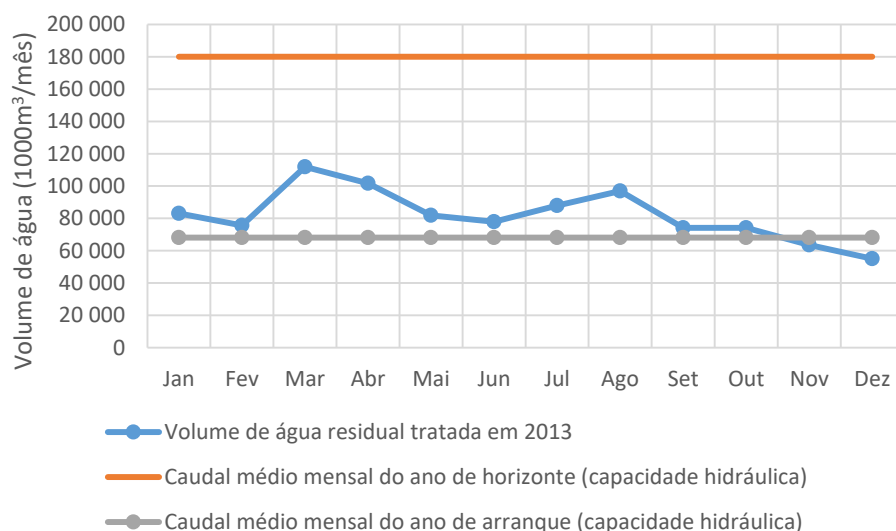


Figura 6.6 – Volume de água residual tratada nos anos de 2013 e 2014 e caudais médios mensais de dimensionamento.

No que diz respeito aos consumos por etapas de tratamento, a maior oscilação diz respeito ao consumo específico de energia no tratamento secundário (I_{Ts1}) (0,49 kWh/m³ em 2013 face a 0,53 kWh/m³ em 2014). Nesta etapa, os equipamentos mais energeticamente consumidores dizem respeito aos sobreprensos na etapa de arejamento com pesos de 66% e 63% no consumo no tratamento secundário relativos aos anos de 2013 e 2014, respetivamente.

Comprova-se que o tratamento secundário constitui a etapa mais consumidora de energia, tal como referenciado na literatura. Seguidamente a etapa com maior consumo associado é o tratamento preliminar, sendo que os equipamentos mais consumidores de eletricidade são os supressores da operação de desarenamento, com potências nominais unitárias de 5,5 kW.

Posteriormente, a fase de tratamento de lamas apresenta consumo específico de eletricidade de 0,07 kWh/m³ em 2013 e 0,06 kWh/m³ em 2014, sendo que o equipamento mais energeticamente exigente diz respeito ao compressor, que permite a agitação na etapa da DA. O consumo referente ao tratamento primário é reduzido face ao consumo global, apenas 1%.

Com recurso às equações 5.2 a 5.6 estimou-se uma produção média anual em 2013 de 64 219 kWh a partir de cogeração do biogás. Este valor indica que a ETAR possuiu neste ano um nível de autossuficiência de 6,64% e uma produção de eletricidade por valorização de biogás de 0,06 kWh/m³ o que indica um desempenho não aceitável da ETAR de acordo com as gamas de valores considerados na Tabela 5.2. Paralelamente a utilização de energia a partir de fontes externas em 2013 foi de 0,71 kWh/m³, indicando um desempenho não aceitável. No que diz respeito ao indicador I_{OT1} , comprova-se um aumento de 2013 para 2014 devido ao aumento do uso da eletricidade, assim os custos aumentaram de 0,08 €/m³ para 0,09 €/m³. Note-se novamente que dada a insuficiência de dados da ETAR de Sesimbra relativamente à distribuição horária dos consumos energéticos pelos períodos de consumo utilizou-se o valor médio de 0,105€ para o cálculo do indicador I_{OT1} .

Apesar dos resultados obtidos não se mostrarem na sua totalidade favoráveis importa realçar que a ETAR de Sesimbra opera num sistema de biofiltros, que se trata de um tipo de tratamento de águas residuais energeticamente exigente, sobretudo pela necessidade de bombagem. Com isto, pretende-se denotar que não se deverá indicar que a ETAR possui um desempenho energético inferior face aos seus pares, dado que somente estabelecendo uma comparação com ETAR a operar com as mesmas condições de operação poderão ser retiradas estas conclusões.

6.2.2. Análise dos consumos de eletricidade

Neste capítulo são analisadas a ETAR de Sesimbra, que opera num sistema de biofiltros e possui um consumo específico de energia elétrica de 0,77 kWh/m³ em 2013 e 82 kWh/m³ em 2014, e a ETAR de Strass im Zillertal, que opera num sistema de lamas ativadas e possui um consumo específico de energia elétrica de 0,35 kWh/m³. A diferença entre os consumos apresentados dever-se-á parcialmente ao tipo de tratamento, tendo em conta que os biofiltros são mais energeticamente exigentes. Note-se novamente a incomparabilidade de dados entre as ETAR.

Em linha com as conclusões obtidas no subcapítulo 5.2.1, novamente se constata pelos requisitos de descarga dos efluentes tratados na ETAR, que a ETAR de Strass im Zillertal necessitará, à partida, de uma maior quantidade de energia no tratamento das águas residuais afluentes relativamente à ETAR de Sesimbra. Também a água residual afluyente à ETAR de Sesimbra, à semelhança da ETAR do Seixal, possui uma maior concentração de matéria orgânica, factor que implica um consumo acrescido de energia para o seu tratamento (Tabela 6.12). Note-se que a concentração de matéria orgânica relativa a Sesimbra e apresentada na Tabela 6.12 diz respeito ao ano de 2013.

Tabela 6.12 – Características dos efluentes austríacos e os da ETAR de Sesimbra (Fonte: Jonasson, 2007; Mendes, 2014)

Parâmetro	Áustria	SSB
CBO ₅ (mg/l)	291	419

A título exemplificativo são em seguida apresentados, na Tabela 6.13, os IDE respeitantes à ETAR de Sesimbra e de Strass. Ainda que não sejam diretamente comparáveis é possível verificar que a ETAR de Sesimbra possui um consumo energético elevado relativamente ao tratamento secundário

Tabela 6.13 – IDE referentes às ETAR de Sesimbra e Strass im Zillertal.

Indicador	ETAR SSB**	ETAR de Strass**
IPRE1 – Consumo energético específico no tratamento preliminar (kWh/m ³)*	0,150	0,070
ITP1 – Consumo energético específico no tratamento primário (kWh/m ³)*	0,011	0,000

* Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

** Ressalva-se que as ETAR não são diretamente comparáveis, os dados apresentados servem somente para demonstrar a possibilidade de alcançar níveis de eficiência energética desta natureza.

(continua)

Tabela 6.13 – IDE referentes às ETAR de Sesimbra e Strass im Zillertal (continuação).

Indicador	ETAR SSB**	ETAR de Strass**
I _{rs1} – Consumo energético específico no tratamento secundário (kWh/m ³)*	0,530	0,155
I _{rl1} – Consumo energético específico no tratamento de lamas (kWh/m ³)*	0,055	0,061
I _{o1} – Consumo energético específico com Outros (kWh/m ³)*	0,075	0,064
I _{G1} – Consumo energético da ETAR (kWh/m ³)*	0,82	0,35

* Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

** Ressalva-se que as ETAR não são diretamente comparáveis, os dados apresentados servem somente para demonstrar a possibilidade de alcançar níveis de eficiência energética desta natureza.

A ETAR de Sesimbra dispõe de equipamentos eficientes, como as bombas e motores e os VFD, razão que justifica o facto de não serem sugeridas substituições destes equipamentos. A ETAR de Sesimbra possui ainda um sistema SCADA o qual já foi programado para retirar maior partido da utilização de energia, nomeadamente promovendo que alguns dos maiores consumidores pontuais (bombas e compressores de lavagem dos filtros trabalhem preferencialmente nas horas de vazio e supervazio, sem que tal situação coloque em cauda a qualidade do tratamento.

6.2.3. Cenário de Produção/Recuperação energética

Avaliou-se a viabilidade da implementação de uma UPAC com base num sistema solar fotovoltaico com uma potência total instalada de 83,5 kWp no que diz respeito ao sistema A e 84,9 kWp relativamente ao sistema B que correspondem às áreas úteis nas instalações em Sesimbra (Figura 6.7). O somatório destas áreas totaliza aproximadamente 540 m² no sistema A e 553 m² no sistema B. Nas Tabelas 6.14 e 6.15 são apresentados com maior nível de detalhe os dados referentes às áreas seleccionadas.



Figura 6.7 – Áreas disponíveis para implementação de painéis solares PV na ETAR de Sesimbra.

Tabela 6.14 – Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema A.

Área (nº)	1	2	3	Total
Área disponível de solo (m ²)	175	330	240	745
Área útil (m ²)	127	239	174	540
Módulos instalados (nº)	70	132	96	300
Potência instalada (kWp)	19,7	36,9	26,9	83,5
Produção estimada anual do sistema A (kWh)	33 800	63 300	46 100	143 200

Tabela 6.15 - Dados referentes às áreas de instalação dos painéis solares PV referentes ao sistema B.

Área (nº)	1	2	3	Total
Área disponível de solo (m ²)	175	330	240	745
Área útil (m ²)	130	245	178	553
Módulos instalados (nº)	72	136	98	306
Potência instalada (kWp)	20,0	37,7	27,2	84,9
Produção estimada anual do sistema B (kWh)	46 200	87 000	62 800	196 000

A título exploratório, considerou-se que o consumo médio mensal é proporcional ao caudal médio mensal afluyente à ETAR do Sesimbra. Com recurso à Figura 6.8 é possível verificar a quantidade de eletricidade produzida com recurso ao aproveitamento PV pelos sistemas A e B face às necessidades globais da ETAR, verificando-se que os meses com maior produção fotovoltaica são os meses de verão.

A produção referente ao sistema A produção de eletricidade anual estimada para o sistema A é inferior à produção relativa ao sistema B (143 200 kWh vs 196 600 kWh). No sistema A, esta produção é capaz de suprir 19% do total de eletricidade requerida para as operações da ETAR enquanto que o sistema B se revela uma opção mais aliciente tendo em conta que permite suprir 26% deste mesmo total. Na Figura apresenta-se ainda o nível de autossuficiência alcançado, cujos valores traduzem o quociente entre a produção e o consumo mensal.

De acordo com os indicadores de desempenho financeiro na Tabela 6.16, constata-se que a implementação de painéis solares PV na ETAR de Sesimbra se trata de um projeto viável. Este facto é suportado pelos valores positivos dos indicadores VAL, TIR e ainda TRC, sendo que se verifica que em ambos os parâmetros o sistema B se revela mais custo-eficaz. Além destes factores, a implementação de um sistema de aproveitamento solar do tipo permite ainda uma poupança anual nos custos referentes à aquisição de energia elétrica advinda da rede de cerca de 17 470€ e no caso do sistema B esta poupança alcança aproximadamente 23 912€.

Como forma de averiguar os impactos advindos da implementação dos painéis solares PV, apresentam-se na Tabela 6.17 alguns os resultados dos IDE selecionados para esta finalidade. Note-se que para estes cálculos foram utilizados dados provenientes do ano de 2013 por escassez de dados do ano seguinte.

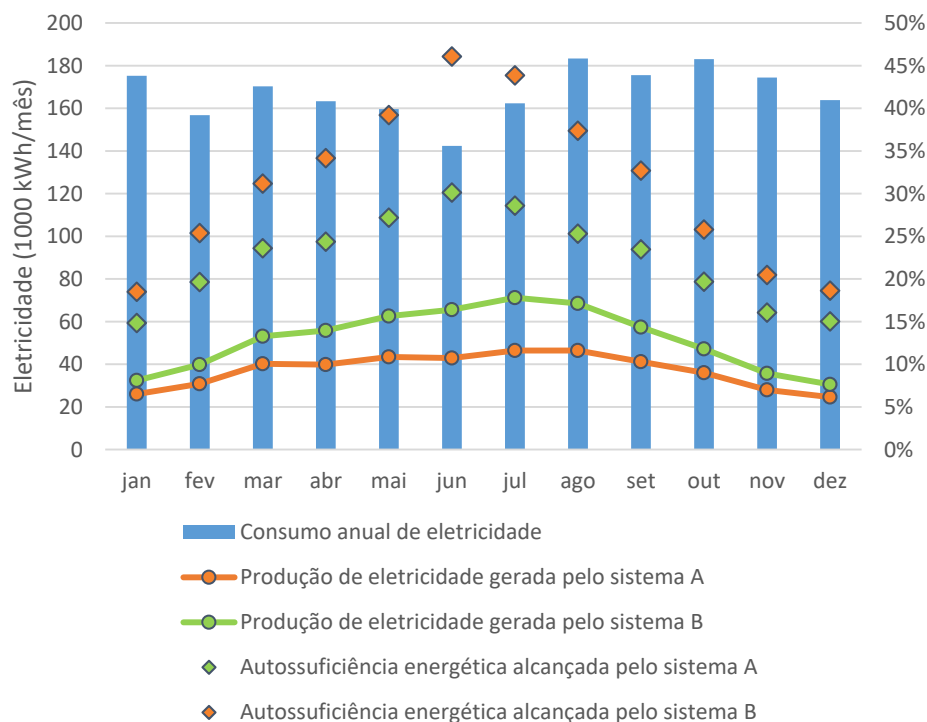


Figura 6.13 – Produção de eletricidade pelos sistemas A e B face ao cenário global na ETAR de Sesimbra.

Tabela 6.16 – Resultados obtidos pela implementação do projeto e indicadores financeiros calculados.

Sistema	CI (€)	CE (€)	R (€)	VAL (€)	TIR (%)	TRC (anos)
A	153 507	7 307	573 275	58 168	8,8	10
B	162 538	7 737	953 909	170 753	13,5	8

Tabela 6.17 – IDE pós-implementação do sistema solar PV na ETAR de Sesimbra.

Indicadores de desempenho	Sistema A	Sistema B	2014
I _{E1} – Autossuficiência energética (%)*	18,6	25,5	8,4
I _{E5} – Utilização de energia a partir de fontes externas (kWh/m ³)*	0,63	0,57	0,71

■ Bom desempenho ■ Desempenho aceitável ■ Desempenho não aceitável

*Estimativa realizada no âmbito da presente dissertação.

A produção de eletricidade pelo sistema A implementado permite alcançar uma autossuficiência de 18,6%, superior em 10,2 p.p. face ao cenário atual, enquanto que o sistema B permite alcançar 25,5%. Consequentemente a utilização de energia a partir de fontes externas decresceu face aos valores atuais tendo-se alcançado um valor de 0,63 kWh/m³ no sistema A e 0,57 kWh/m³ no sistema B, contudo paralelamente ao resultado obtido face à situação atua indica um desempenho não aceitável.

7. Conclusões e recomendações para estudos futuros

Neste capítulo são apresentadas de forma sucinta as conclusões. Seguidamente são ainda apresentadas as limitações do estudo e apontadas algumas recomendações de investigação futura de continuidade ao trabalho desenvolvido.

7.1. Conclusões

O tópico autossuficiência energética é cada vez mais relevante em ETAR devido aos custos crescentes com a energia e à importância das questões ambientais associadas ao consumo de energia produzida por fontes não renováveis. A minimização dos consumos energéticos constitui um aspeto relevante dado que as ETAR possuem elevadas exigências energéticas, sobretudo de eletricidade, o que representa um peso considerável nas necessidades energéticas do país. Revela-se assim relevante assumir uma gestão eficiente dos consumos energéticos aliada à aplicação medidas de eficiência energética e à aposta em energias renováveis em ETAR.

A dissertação visou analisar os consumos energéticos das ETAR através dos cenários: situação de referência; análise dos consumos de eletricidade; cenário de produção energética. Para o estudo selecionaram-se as ETAR do Seixal e de Sesimbra. A Situação de referência incidiu nos consumos de eletricidade das ETAR entre 2013 e 2014, recorrendo-se a um sistema de indicadores de desempenho energético (IDE) e a valores de referência e valores-alvo.

O cenário de análise dos consumos de eletricidade nas ETAR teve por objetivo examinar os consumos de eletricidade e equipamentos que dispõem, bem como analisar um caso de uma ETAR que conseguiu alcançar um balanço neutro de energia. Por fim, o cenário de produção energética visou avaliar a viabilidade financeira da implementação de painéis PV nas ETAR analisadas e ainda qual o tipo de sistemas PV mais custo-eficaz sendo analisado um sistema de painéis fixos (sistema A) e um sistema de painéis com sistema *tracking* de um eixo (sistema B).

Na ETAR do Seixal, o consumo específico de energia elétrica por volume de água residual tratada revelou que a ETAR apresenta um desempenho não aceitável de acordo com a metodologia desenvolvida por Reis (2016). Porém, a análise deste indicador a título individual não permite concluir um baixo desempenho energético. O indicador respeitante ao consumo específico de energia por quantidade em kg de matéria orgânica no efluente revela que a ETAR apresenta um bom desempenho energético.

Nesta ETAR, o consumo mais elevado diz respeito à etapa de tratamento secundário (cerca de 57% do consumo total em 2014). O aumento deste consumo em 2014 deverá estar relacionado com a diminuição do volume de água residual afluente à ETAR, necessitando de operar abaixo da sua capacidade. Outra justificação diz respeito a um problema detetado e com estudos e medidas de redução/eliminação em curso, juntamente com a entidade gestora da rede “em baixa” de entrada de água estuarina – com elevada salinidade que afeta o tratamento secundário e de lamas e, conseqüentemente, a energia produzida por cogeração.

A ETAR do Seixal dispõe de equipamentos eficientes devido à contínua promoção da melhoria da eficiência energética nas suas operações, pelo que tendo em conta este facto não se considerou oportuna a substituição dos mesmos. Como medidas de eficiência energética a serem implementadas sugere-se a continuação da investigação e resolução do problema de entrada de água na rede de saneamento com elevada salinidade, o que permitirá não só otimizar a produção de energia por cogeração, como as etapas de tratamento secundário e de lamas o que, por sua vez, permitirá uma redução dos consumos energéticos atuais da ETAR.

Os valores obtidos para os indicadores financeiros suportam a viabilidade da implementação de ambos os sistemas de energia PV, sendo todos eles positivos, e ressaltando que os TRC obtidos são inferiores ao tempo de vida útil do sistema. Constata-se que o sistema B é a solução mais custo-eficiente. Estes projetos permitiriam satisfazer, em termos médios, aproximadamente 22% do consumo anual de eletricidade na ETAR do Seixal e o sistema B cerca de 31%.

Na ETAR de Sesimbra, o consumo específico de energia elétrica por quantidade de matéria orgânica na água residual afluente revela um desempenho aceitável. No que diz respeito à produção de eletricidade por cogeração no ano em análise, evidenciou-se oportunidades de melhoria. À ETAR de Sesimbra encontra-se igualmente integrada no grupo AdLVT e dispõe de equipamentos eficientes, razão que justifica a não substituição dos seus equipamentos. Regista-se contudo que a energia elétrica produzida por cogeração já conduz a produções superiores ao consumo em alguns instantes. Assim, previamente ao desenvolvimento de qualquer projeto importa avaliar a forma como a energia pode ser consumida e/ou entregue à rede pública.

Os resultados obtidos revelam que a implementação de painéis solares fotovoltaicos do sistema A permitiriam satisfazer na ETAR de Sesimbra, em termos médios, cerca de 19% das necessidades globais anuais de eletricidade da ETAR e o sistema B resultaria numa autossuficiência de cerca de 26%. Os valores obtidos para os indicadores financeiros suportam a viabilidade da implementação de ambos os sistemas e os TRC obtidos são inferiores ao tempo de vida útil do sistema. O sistema B revelou-se a solução mais custo-eficaz.

A análise de uma ETAR com um balanço neutro de energia, a ETAR de Strass im Zilletral, permitiu comprovar a possibilidade de ser possível que a produção de energia elétrica supere as necessidades da instalação. No entanto, este consumo não deverá ser tido como referência para os casos nacionais servindo somente para demonstrar que uma gestão eficiente e contínua dos consumos nas ETAR permite alcançar resultados notáveis.

Apesar de no estudo não ser possível alcançar um balanço neutro de energia nas ETAR analisadas salienta-se que estas reduções nos consumos de energia de fontes de energia não renováveis, caso possam ser implementadas sem outros custos acrescidos, constituem contributos notáveis em termos financeiros e ambientais. Importa ainda referir que tendo em conta que os preços dos sistemas solares PV continuam a decrescer e dadas as condições do nosso país em termos de radiação solar espera-se que estejam presentes cada vez mais ETAR.

No que diz respeito ao dimensionamento de sistemas PV, os perfis de consumo são variáveis, tal como os tarifários, a área disponível para a implementação do sistema e a orientação do local. Assim, quando se aborda o autoconsumo é essencial um dimensionamento específico tendo em conta os perfis de consumo. Nas ETAR a implementação destes sistemas apresentam as seguintes vantagens: os horários de funcionamento e maiores consumos associados são coincidentes com as horas de produção dos sistemas solares; as ETAR possuem geralmente áreas mais extensas aptas para a instalação de painéis solares PV.

A compreensão da forma como a energia é distribuída pelos diferentes processos e operações das ETAR constitui um aspeto crítico no sentido da prossecução das metas de desenvolvimento sustentável integradas no Pacote Energia e Clima 20-20-20. Contudo, é possível constatar que existe uma falta de documentos normativos e guias para a determinação do desempenho das ETAR ao nível da sua eficiência energética.

Esta dificuldade é suportada pela elevada complexidade das operações e processos de uma ETAR. Desta forma, cada ETAR consiste um caso particular e tendo em conta as diferenças entre as estações as comparações deverão ser efetuadas com as devidas distâncias. Estes processos de *benchmarking* deverão ter em conta os requisitos de descarga dos efluentes, tipo de operação e processos das ETAR e ainda outras características específicas das mesmas.

Também o facto da ADP desenvolver um processo contínuo de gestão dos consumos de energia permite melhorias significativas nas ETAR, tendo sido perceptível que é efetuado um exigente controlo energético nas ETAR. No entanto, note-se que podem existir consumos acrescidos que não representam uma má gestão da empresa mas poderão ser causados pelo dimensionamento que foi efetuado tendo em vista um desenvolvimento populacional que não se verificou, não sendo atingidos nem os valores de caudais nem de carga para que a estação foi projetada. Este sobredimensionamento foi verificado para as ETAR em análise.

As condições externas aos sistemas podem também contribuir para uma ineficiência energética das ETAR nomeadamente as políticas de energia. Salienta-se a existência de ETAR sem autorização para vender à rede a energia produzida nas instalações Portugal e que a fim de não comprometerem o sistema de produção são forçados a criar consumos energéticos artificiais, verificando-se assim uma ineficiência do sistema global destas ETAR.

Em suma, foi possível comprovar que os recursos água e energia estão firmemente conectados e que as ETAR representam um exemplo desta interação. O conhecimento desta ligação trata-se do ponto de partida para que possam ser efetuadas alterações que visem alcançar um balanço neutro de energia nas ETAR. As ETAR nacionais podem não só transformar os seus processos e operações de forma a diminuir os seus consumos energéticos, bem como tornar-se locais de produção de energia, não só pela energia contida no próprio afluente mas também pelo aproveitamento e produção com base em fontes renováveis de energia.

7.2. Limitações

O acesso à informação foi uma das principais limitações tanto a nível nacional como internacional, factor que levou à necessidade de se recorrer a estimativas, o que por sua vez acarreta uma incerteza associada. No caso da ETAR de Sesimbra as estimativas incidiram sobretudo na produção de energia elétrica por cogeração, no cálculo de alguns dos indicadores de desempenho selecionados, assim como os custos com energia tendo-se considerado uma tarifa trifásica em regime de MT.

Também no caso da ETAR do Seixal foi necessário recorrer a estimativas para o cálculo dos custos com energia elétrica e de alguns dos indicadores de desempenho. Para esta ETAR foi necessário corrigir os dados respeitantes aos consumos energéticos por equipamentos disponibilizados em Marques (2016) tendo em conta que estes possuíam incertezas associadas consideráveis uma vez que os consumos foram calculados através das características dos equipamentos e não medidas diretamente (anexo A) e o valor da soma era discrepante do valor publicado pela própria empresa.

Cada ETAR pode estar sujeita a diferentes condições de operação e restrições pelo que esta divergência pode ter um impacto significativo no tipo de tratamento utilizado, e consequentemente nos seus consumos energéticos. A inexistência de valores de referência para o caso das ETAR que operam num sistema de biofiltros, que possuem consumos mais elevados, não permitiu uma análise com um maior nível de detalhe relativamente ao desempenho energético da ETAR de Sesimbra.

Dado que grande parte das ETAR não possui nenhum sistema de monitorização de energia que permitam a perceção do real funcionamento dos equipamentos e que este facto constitui um entrave no sentido de uma boa gestão do consumo de eletricidade, sugere-se a instalação de contadores de energia nas ETAR, denominados *smart meters*. Desta forma, seria possível monitorizar de forma mais eficaz os consumos e atuar prontamente em caso de anomalias.

De ressaltar que tendo em conta que os preços associados à implementação de projetos solares PV não são constantes, pelo que a análise efetuada se baseia em informação previsional, o que induz uma incerteza associada. Por outro lado, os valores obtidos através da plataforma de cálculo de energia produzida pelos painéis solares PV podem por vezes não corresponder aos valores realmente alcançados dado que têm em conta as eficiências obtidas em laboratório e não têm em conta outros aspetos inesperados como paragens para manutenção ou problemas de funcionamento. Desta forma, muitas vezes estes valores encontram-se sobredimensionados.

7.3. Recomendações para estudos futuros

Apesar de ser importante ver cada ETAR como um caso isolado é necessária uma abordagem mais abrangente, pelo que se considera relevante proceder à elaboração de um manual dos consumos energéticos em ETAR a nível nacional, no qual fosse abordada a metodologia geral para análise dos consumos energéticos, assim como propostas de melhorias de desempenho

energético. Este guia teria como principal objetivo o estabelecimento de metas, *i.e.* um *benchmarking* nacional, procurando assimilar os processos praticados pelas ETAR com melhor desempenho e superá-los.

Assim, numa primeira fase, seria necessário recorrer ao levantamento das informações específicas das ETAR, através de visitas às instalações, envio de questionários e análise de informação documentada. Estas informações devem incluir as características de projeção e operação das ETAR, bem como informações sobre as condições climáticas e topográficas e dados detalhados acerca dos seus equipamentos, como a idade, número de horas em funcionamento e a potência real consumida, sobretudo das bombas e compressores dado que estes representam uma parte considerável nos consumos de eletricidade das ETAR.

Este levantamento permitiria a segregação de ETAR por capacidade e por tipo de tratamento aplicado, bem como verificar quais as áreas mais problemáticas e conseqüentemente dirigir uma maior atenção ao estabelecimento de medidas de minimização energética. Numa fase seguinte, os dados seriam analisados e comparados com recuso a um sistema de ID, que deverá não só incluir indicadores relativos aos consumos energéticos aplicados tanto às etapas gerais como a determinados equipamentos, mas também em relação à qualidade do serviço prestado, dado que a principal função das ETAR é assegurar a qualidade dos efluentes descarregados.

Os resultados obtidos da sua aplicação permitiriam determinar os valores-alvo a alcançar com base nos valores obtidos para os 10% constituídos pelas ETAR com melhor desempenho energético. Desta forma seria possível proceder a uma estipulação de metas a alcançar num período de tempo adequado, tendo por base tanto a integração das medidas de eficiência energética e de conservação ajustadas ao perfil da ETAR, como possibilidades de recuperação e produção energética em ETAR de acordo com condições climatéricas e de terreno com o intuito de melhorar o nível de autossuficiência das ETAR. A sistematização dos dados dispostos no Manual serviria de contributo para a projeção e operação de futuras ETAR.

Através da revisão de literatura efetuada verificou-se ainda a existência de uma lacuna no estudo de eficiência energética que diz respeito à carência de uma revisão técnica e económica abrangente de tecnologias existentes e emergentes de recuperação, conservação e produção de energia em ETAR para que seja facilitada a sua replicação. Desta forma, esta revisão seria igualmente contemplada no Manual, com demonstrações das possibilidades de reduções dos consumos com base nas tecnologias implementadas.

Por fim, como continuação direta do presente trabalho sugere-se a continuação do estudo da implementação dos painéis solares fotovoltaicos numa vertente mais técnica, analisando a integração dos dados sobre os perfis de consumo de ambas as ETAR e o perfil de produção dos equipamentos. Nesta análise deverão ser igualmente considerados todos os custos inerentes ao projeto referentes às alterações no sistema elétrico.

Referências bibliográficas

- Adlvt (Águas de Lisboa e Vale do Tejo). (2016). O Sistema. Disponível em <http://goo.gl/fcUa3c>, consultado a 28 de Junho de 2016.
- AdP (Águas de Portugal). (2015). Combate às alterações climáticas. Disponível em: goo.gl/eQa7iR, consultado a 3 de Novembro de 2016.
- Agrotejo (União Agrícola do Norte do Vale do Tejo); Agromais (Entrepasto Comercial Agrícola, C.R.I.). (sem data). ELETRICIDADE – Tarifas e Horários 2014. Agrotejo, Golegã.
- Aichinger, P.; Wadhawan, T.; Kuprian, M.; Higgins, M.; Ebner, C.; Fimml, C.; Murthy, S.; Wett, B. (2015). Synergistic co-digestion of solid-organic-waste and municipal-sewage-sludge: 1 plus 1 equals more than 2 in terms of biogás production and solids reduction. *Water Research* **87**, 416–423.
- Alegre H., Melo Baptista J., Cabrera Jr E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. & Parena R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services*, 2ª edição. Manual of Best Practices Series. IWA Publishing, London. pp. 312.
- Andreu, P. S.; Mifsut, C. L.; Soler, M. A. (2012). Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia. *Ingeniería Civil*. (CEDEX). Nº **168**. Disponível em: <http://goo.gl/rdr9Uh>, consultado a 4 de Julho de 2016.
- APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis). (sem data). Biogás (out). Disponível em: goo.gl/iswJBp, consultado a 5 de dezembro de 2016.
- AS Solar Ibérica. (2015). Instalação de autoconsumo instantâneo com injeção zero. *Renováveis magazine* **22**.
- Awe, O. W.; Liu, R.; Zhao, Y. (2016). Analysis of Energy Consumption and Saving in Wastewater Treatment Plant: Case Study from Ireland. *Journal of Water Sustainability* **6**(2), 63-76
- Bachmann, N. (2015). *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*. IEA Energy Technology Network, IEA Bioenergy, USA. pp. 20.
- Balmér, P.; Hellström, D. (2012). Performance indicators for wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, **65**(7), 1304-1310.
- Belloir, C.; Stanford, Soares, A. (2015). Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout. *Environmental Technology*, **36**(2), 260–269.
- Benedetti, L; Dirckx, G.; Bixio, D.; Thoeye, C.; Vanrolleghem, P. A. (2008). Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system. *Journal of Environmental Management* **88**, 1262–1272.
- Bodík, I; Kubask, M. (2013). Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering* **39**(2), 15-24.

- Brealey, R., Myers, S., Allen, F. (2011), *Principles of corporate finance*. McGraw-Hill Irwin Companies, 10ª edição, New York, USA. pp. 101-109.
- Brechlin, U.; Pilgard, O.; Piria, R. (2003). *Sun in Action II - A Solar Thermal Strategy for Europe*. Volume 1 – Market Overview, Perspectives and Strategy for Growth. ESTIF a.i.s.b.l. – European Solar Thermal Industry Federation, Bruxelas, Bélgica. pp. 79.
- Brown, R. (2009). Energy efficiency and renewable energy technologies in wastewater management. Testimony on sustainable wastewater management. Subcommittee on water resources and environment house committee on transportation and infrastructure.
- CCBS Energia. (2016). Produtos: Painéis Fotovoltaicos. Disponível em: goo.gl/8qPpM1, consultado a 30 de Agosto de 2016.
- CTCP (Centro tecnológico do calçado em Portugal). (2009). Guia do empresário.
- Daw, J.; Hallett, K.; DeWolfe, J.; Venner, I. (2012). *Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities*. Nacional Renewable Energy Laboratory Report, USA. pp. 25.
- De Hass, D. W.; Foley, J.; Marshall, B.; Bartle-Smith, J. (2015). *Benchmarking Wastewater Treatment Plant Energy Use in Australia*. Conferência: Australian Water Association Ozwater'15 Conference, 12 a 14 Maio de 2015, Adelaide. pp. 11.
- Decreto-Lei nº 152/1997 de 19 de Junho. Diário da República nº 139/97 – I Série A. Ministério do Ambiente. Lisboa.
- Decreto-Lei nº 236/1998 de 19 de Junho. Diário da República nº 176/98 – I Série A. Ministério do Ambiente. Lisboa.
- Decreto-Lei nº 71/2008 de 15 de Abril. Diário da República nº 74/2008 – Série I. Ministério da Economia e da Inovação, Lisboa.
- Dervishi, A.; Uka, A.; Jovani, A. (sem data). *Improvement of Energy Efficiency in Waste Water Treatment Plant, Pogradec City, Albania* (Case Study). Conferência: Energy-Saving & Energy Efficiency in water & waste water treatment systems, Water Regulatory Authority of Albania. Tirana. pp. 10.
- DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia). (2013). *Energia em Portugal*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, Lisboa. pp. 77.
- ENERWATER. (2015). *Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants* - Deliverable 2.1 Study of published energy data. Comissão Europeia. pp. 32.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (1996). *Water and Wastewater Industries: Characteristic and Energy Management Opportunities*. EPRI Community Environmental Center. St. Louis, Missouri.

EPRI (Electric Power Research Institute). (2002). *Water & Sustainability* (Volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century. Technical Report, USA.

EPRI (Electric Power Research Institute). 1994. *Energy Audit Manual for Water/Wastewater Facilities: A Guide for Electric Utilities to Understanding Specific Unit Processes and Their Energy/Demand Relationships at Water and Wastewater Plants*. EPRI Community Environmental Center. St. Louis, Missouri.

ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos). (2016). *Tarifas transitórias de venda a clientes finais em Portugal continental em 2016*. Disponível em: goo.gl/5zQ5mx, consultado a 20 de Agosto de 2016.

Eufores; Eclareon; Fraunhofer ISI; Vienna University of Technology. (2015). *EU tracking roadmap 2015. Keeping Track of Renewable Energy Targets towards 2020*. Projeto Keep on Track.

Europe Solar DE. (2016). Step 1: Intro, PV Peak Power. Disponível em: goo.gl/J33dKZ, consultado a 27 de setembro de 2016.

EWC (Energy Center of Wisconsin). (2002). Roadmap for the Wisconsin Municipal Water & Wastewater Industry. EWC, Wisconsin, USA. pp. 61.

Expresso. (2016). Economia: Portugal fechou 2015 com a eletricidade e gás mais caros da Europa. Disponível em: goo.gl/akfrjj, consultado a 2 de Setembro de 2016.

Feldman, D.; Barbose, G.; Margolis, R.; James, T.; Weaver, S.; Darghout, N.; Fu, R.; Davidson, C.; Booth, S.; Wiser, R. (2014). Photovoltaic system pricing trends, Historical, Recent and Near Term Projections, NREL – Nacional Renewable Energy Laboratory, USA.

Fenu, A.; Roels, J.; Wambecq, T; De Gussem, K.; Thoeye, C.; De Guelre, G.; Van De Steene, B. (2010). Energy audit of a full scale MBR system. *Desalination* **262**, 121-128.

FF Solar Energias Renováveis. (2016). Lista de preços.

Foladori, P.; Vaccari, M.; Vitali, F. (2015). Energy audit in small wastewater treatment plants: Methodology, energy consumption indicators, and lessons learned. *Water Science & Technology* **72**(6), 1007-1015.

Frijns, J.; Hofman, J., Nederlof, M. (2013). The potential of (waste)water as energy carrier. *Energy Conversion and Management* **65**, 357–363.

Gao, H.; Scherson, Y. D.; Wells, G. F. (2014). Towards energy neutral wastewater treatment: methodology and state of the art. *Environmental Science Processes & Impacts* **16**(6), 1223-1246.

Godinho, F. M. S. G. (2015). Redução do consumo energético e das emissões de gases com efeito de estufa no tratamento de águas residuais. Um roteiro de ação para entidades gestoras. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente. Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Lisboa. pp. 380.

GREENPRO. (2002). *Energia fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. GREENPRO, Lisboa, Portugal. pp. 368. Disponível em: goo.gl/pZqTtR, consultado a 24 de Agosto de 2016.

GREENPRO. (2004). *Energia Solar Térmica. Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. GREENPRO, Lisboa, Portugal. pp. 262.

Gu, Y.; Dong, Y.; Wang, H.; Keller, A.; Xu, J.; Chiramba, T.; Li, F. (2016). Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water–energy nexus perspective. *Ecological Indicators* **60**, 402-409.

Gude, V. G. (2015a). Energy positive wastewater treatment and sludge management. *Edorium Journal of Waste Management* **1**, 10-15.

Gude, V. G. (2015b). Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. *Renewable and sustainable energy reviews* **45**, 52–68.

Iowa Energy Centre. (2016). Solar PV Energy Guide. Home Series 5. Iowa, USA.

IRENA (Internacional Renewable Energy Agency). (2012a). *Renewable energy technologies: cost analysis series. Concentrating Solar Power*. Volume 1: Power Sector Issue 2/5. Disponível em: goo.gl/HnH9Az, consultado a 20 de agosto de 2016.

IRENA (Internacional Renewable Energy Agency). (2012b). *Renewable energy technologies: Cost analysis series. Solar Photovoltaics* Volume 1: Power Sector Issue 4/5. Disponível em: goo.gl/HnH9Az, consultado a 20 de agosto de 2016.

IS-Energy (IS Energy, Energias Renováveis). (2015). Energia solar fotovoltaica – Sistemas Autónomos. Disponível em: <http://goo.gl/yPiRph>, consultado a 24 de agosto de 2016.

Jenkins, D., Wanner, J. (2014). *Activated Sludge - 100 Years and Counting*. IWA Publishing, London, UK. pp. 464.

Jenkins, T. (1999). Retrofitting VFD motors at a wastewater treatment plant. *Electrical Construction and Maintenance*. Disponível em: goo.gl/fK0YGV, consultado a 20 de Agosto de 2016.

Jonasson, M. (2007). Energy Benchmark for Wastewater Treatment Processes - a comparison between Sweden and Austria. Master's degree in Civil Engineering thesis. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, Suécia. pp. 74.

Katehis, D.; Wett, B.; Loosdrecht, M. (2010). *Best Practices For Sustainable Wastewater Treatment Initial Case Study Incorporating European Experience And Evaluation Tool Concept (Executive summary)*. WERF Report N° OWSO4R07a. Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA, USA.

Khalid, A.; Arshad, M.; Anjum, M.; Mahmood, T.; Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* **31**(8), 1737-1744.

Krannich (Krannich The Global PV Experts). (sem data). Perguntas sobre a energia solar feitas pelos utilizadores energéticos. Disponível em: goo.gl/GMEBQz, consultado a 25 de Agosto de 2016.

Lazarova, V.; Choo, K.; Cornel, P. (2012). *Water - Energy Interactions in Water Reuse*. IWA Publishing, London, UK. pp. 89-90.

Li W.; Li L.; Qiu G. (2016). Energy consumption and economic cost of typical wastewater treatment systems in Shenzhen. *Journal of Cleaner Production*. Conferência: Energy Economics: New Challenges & Solutions. Beijing, China.

Liu F.; Ouedraogo A.; Manghee S.; Danilenko A. (2012). A Primer on Energy Efficiency for Municipal Water and Wastewater Utilities. Documento do Programa de Assistência à Gestão do Setor de Energia, ESMAP – Energy Sector Management Assistance Program, Washington DC, USA pp. 72.

Long, S.; Cudney, E. (2012). Integration of energy and environmental systems in wastewater treatment plants. *International journal of energy and environment*, **3**(4), 521-530.

Lundie, S.; Peters, G. M.; Beavis; P. C. (2004). Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. *Environmental Science & Technology* **38**, 3465-3473.

Manzano, J. J.; Chalifour, N.; Kotzé, L. J. (2016). Energy, Governance and Sustainability. The IUCN Academy of Environmental Law Series. Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, UK e Northampton, Massachusetts, USA. pp. 352.

Marques, P. M. L. (2015). Implementação de um Sistema de Gestão de Energia. Tese de Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal - Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal. pp. 205.

Means, E. (2004). *Water and wastewater industry energy efficiency: A Research Roadmap*. AwwaRF – Awwa Research Foundation, USA. pp. 129.

Mendes, R. M. V. (2014). Contributo para a avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para a produção de energia elétrica. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Almada. pp. 149.

Mizuta, K.; Shimada, M. (2010). *Benchmarking* energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Internacional Water Association, Water Science & Technology* **65**(10), 2256-2262.

Molinos-Senante, M.; Hernandez-Sancho; F.; Sala-Garrido, R. (2013). *Benchmarking* in wastewater treatment plants: a tool to save operational costs. *Clean Technology Environmental Policy* **16**, 149–161.

Navarte, L.; Lorenzo, E. (2008). Tracking and Ground Cover Ratio. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. *Progress in Photovoltaics Research and Applications* **16**(8), 703–714

NEWRI (Nanyang Environment & Water Research Institute); PUB Singapore; GRWC (Global Water Research Coalition). (sem data). *Water & energy in the urban water cycle, Improving Energy Efficiency in Municipal Wastewater Treatment*.

Nowak, O.; Keil, S.; Fimml, C. (2011). Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants. *Water Science & Technology*, **64**(1), 1–6.

Ong, S.; Campbell, C.; Denholm, P.; Margolis, R.; Heath, G. (2013). *Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States*. NREL. Disponível em: goo.gl/YjJ61E, consultado a 26 de setembro de 2016.

Ostapczuk, R. E.; Bassette, P. C.; Dassanayake, C.; Smith, J. E.; Bevington, G. (2011). Achieving zero net energy utilization at municipal WWTPs: the Gloversville–Johns-town Joint WWTP experience. *Energy and Water Proceedings of the Water Environment Federation*, NY. pp. 1191–200.

Pabi, S.; Amarnath, A.; Goldstein, R.; Reekie, L. (2013). *Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries*. WRF – Water Research Foundation; EPRI – Electric Power Research Institute, California, USA. pp. 194.

Panepinto, D.; Fiore, S.; Zappone, M.; Genon, G.; Meucci, L. (2015). Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy* **161**, 404–411.

Pearce, G. K. (2008). UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs. *Desalination* **222**: 66–73.

Piatek, M.; Lisowski, A.; Kasprzycka, A.; Lisowska, B. (2016). The dynamics of an anaerobic digestion of crop substrates with an unfavourable carbon to nitrogen ratio. *Bioresource Technology* **216**, 607-612.

Pires, A. F. F. E. (2009). Contribuição para o estudo de avaliação do desempenho de um sistema de estabilização anaeróbia e utilização do gás produzido. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Perfil Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Almada. pp. 151.

Plappally, A. K.; Lienhard, J. H. (2011) Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 4818-4848.

Portal das Energias Renováveis. (2016). Biomassa - Biocombustíveis gasosos. Disponível em: goo.gl/UOeR9x, consultado a 29 de Agosto de 2016.

PrimeEnergy Solar Systems. (2016). Portugal fecha 2015 com bons resultados da produção Nacional de eletricidade renovável. Disponível em: goo.gl/zfk920, consultado a 25 de agosto de 2016.

Quercus; APREN (Associação das energias renováveis). (2015). Comunicado de imprensa: “Quercus e APREN apelam à constituição do investimento em renováveis”, a 11 de Janeiro de 2015, Lisboa.

Rego, R. R. (2012). Performance analysis of the wastewater treatment plants using a metabolism model (Extended abstract). Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Lisboa. pp. 12.

Reis, C. D. P. S. (2016). Assessing and improving wastewater treatment performance. A contribution to the 3rd generation of the assessment system. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Lisboa. pp. 226.

Renewable Energy World. (2016). Advantages and disadvantages of Solar Photovoltaic – Quick Pros and Cons of Solar PV. Disponível em <http://goo.gl/w9wLig>, consultado a 25 de Julho de 2016.

Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernández-Sancho, F., Moreira, M. T. & Feijoo, G. (2011). Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Research* **45**, 5997–6010.

Rutz, D. (2015). *Sustainable heat use of Biogas Plants*. Handbook. WIP Renewable Energies, 2^a edição. Munique, Alemanha, pp. 92.

Saghafi, S.; Merhdadi, N; Hendy, G. N. B.; Rad, H. A. (2015). Energy efficiency in wastewater treatment Plant emphasizing on cod removal: A case study of amol industrial zone, Iran. *Canadian Journal of Pure and Applied Sciences* **9**(2), 3441-3448.

Santos, P. (2000). Guia Técnico do biogás. CCE - Centro para a Conservação de Energia, AGEEN – Agência para a energia. Amadora, pp.117.

Schwarzenbeck, N.; Pleiffer, W.; Bomball, E. (2008). Can a wastewater treatment plant be a powerplant? A case study. *Water Science & Technology* **57**(10), 1555-1561.

Serrano, C. I. G. (2014). Impactes da Presença de Água do Estuário do Rio Tejo em ETAR. Caso de Estudo – ETAR do Seixal. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente, perfil Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Almada. pp. 128.

Shen, Y.; Linville, J. L.; Urgun-Demirtas, M.; Mintz, M. M.; Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **50**, 346-362.

Silva C., Ramalho P., Quadros S., Alegre H., Rosa M. J. (2012). Results of 'PAST21' - the Portuguese initiative for performance assessment of water and wastewater treatment plants. *Water Science and Technology - Water Supply* **12**(3), 372-386.

Silva, C.; Rosa, M. J. (2015). Energy performance indicators of wastewater treatment: a field study with 17 Portuguese plants. *Water Research* **72**(4), 510 – 519.

Simões, C.; Rosmaninho, I.; Henriques, A. G. *Guia para a avaliação de impacte ambiental de Estações de tratamento de Águas Residuais*. APA – Agência Portuguesa do Ambiente, Lisboa. pp. 92.

- SIMTEJO. (2012). *Relatório de Sustentabilidade 2012*. Grupo Águas de Portugal.
- SMAT (Grupo Società Metropolitana Acque Torino). (2015). *Bilancio di Sostenibilità. Responsabilità Economica Sociale e Ambientale*, Torino – Itália.
- SMAT (Grupo Società Metropolitana Acque Torino). (sem data). *La depurazione delle acque reflue urbane. L'impianto per l'area Metropolitana Torinese*, Torino – Itália.
- Soares, J., Fernandes, A., Marçõ, A., Marques, J. (1999). *Avaliação de Projetos de Investimento na Ótica Empresarial*, Edições Sílabo, Lda., Lisboa, pp. 23-35.
- Stillwell, A. S.; Hoppock, D. C.; Webber, M. E. (2010). Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability* **2**, 945-962.
- Tao, X.; Chengwen, W. (2012). Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China. International Water Association. Conference: World Congress on Water, Climate and Energy, Dublin, Ireland.
- Taylor, M.; Daniel, K.; Ilas, A.; Young So, E. (2014). *Renewable Power Generation Costs in 2014*. IRENA – International Renewable Energy Agency. Disponível em: goo.gl/HnH9Az, consultado a 20 de Agosto de 2016.
- Taylor, M.; Ralon, P.; Ilas, A. (2015). The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025
- Tchobanouglos, G.; Burton, F.L.; Stensel, H.D. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, 4ª edição, Metcalf & Eddy, McGraw Hill, Inc., New York.
- Trapote, A.; Ibaladejo, A.; Simón, P. (2014). Energy consumption in an urban wastewater treatment plant: the case of Murcia Region (Spain). *Civil Engineering and Environmental Systems* **31**(4), 304–310.
- U.S. Department of Energy. (2013a). Solar Performance and Efficiency, Disponível em: goo.gl/x9XlaQ, consultado a 25 de Agosto de 2016.
- U.S. Department of Energy. (2013b). Solar Photovoltaic Cell Basics. Disponível em: goo.gl/WJVsyZ, consultado a 25 de Agosto de 2016.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2006). *Wastewater Management Fact Sheet – Energy Conservation*.
- U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). (2013). *Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities*. Local government climate and energy strategy guides.
- União Europeia (UE). (2015). Energia. Disponível em <http://goo.gl/HsHL76>, consultado a 30 de Março de 2016.

Van Horne, M. P.; Rohrbacher, J.; Pitt, P. (2013). Coming Full Circle: Moving Wastewater Treatment Plants Toward Energy Neutrality. *Florida Water Resources Journal*. WEFTEC 2012: Session 101 through Session 110, pp. 7646-7663(18).

Water World. (2016). OR wastewater treatment plant first in Northwest to achieve net-zero-energy status. Disponível em: goo.gl/q97Wlv, consultado a 25 de Agosto de 2016.

WERF (Water Environment Research Foundation). (2010). *Sustainable Treatment: Best Practices from the Strass im Zillertal Wastewater Treatment Plant*. Caso de estudo. Water Environment Research Foundation.

Wett, B. (2016). Comunicação pessoal via correio eletrónico.

Wett, B.; Buchauer, K.; Fimml, C. (2007). Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. IWA Leading-Edge Conference. 4–6 June 2007, Singapore.

World Water Works. (2013). Presented in Pacific Water Conference a 5 de fevereiro de 2015.

WRF (Water Research Foundation). (2015). *Water and Wastewater Utility Energy and Research Roadmap*. Water Research Foundation, California Energy Commission, New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), U.S.A. pp. 199.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. Paris, UNESCO.

ZERO (Associação Sistema Terrestre Sustentável). (2016a). Consumo de eletricidade em Portugal foi assegurado durante mais de 4 dias seguidos por fontes renováveis. Disponível em: goo.gl/vGZvlu, consultado a 20 de Agosto de 2016

ZERO (Associação Sistema Terrestre Sustentável). (2016b). ZERO considera que Portugal tem de fazer transição energética mais rápida para 100% renováveis. Disponível em: goo.gl/mrE7EW, consultado a 20 de Agosto de 2016.

ANEXOS

Anexo A – Consumos energéticos das ETAR

Anexo A1 – Consumos energéticos da ETAR do Seixal em 2013 e 2014.

Etapas de tratamento	ETAR SSX							
	2013				2014			
	kWh ¹	%	kWh/m ³ (estimados pelos dados)	kWh/m ³ (ajustado)	kWh ¹	%	kWh/m ³ (estimados pelos dados)	kWh/m ³ (ajustado)
Pré-tratamento	406 819	14	0,09	0,05	391 208	15	0,09	0,07
Tratamento Primário	24 295	1	0,005	0,003	20 119	1	0,004	0,003
Tratamento Secundário	1 596 042	56	0,33	0,21	1 524 929	57	0,34	0,26
Filtração/Desinfeção	12 597	0	0,003	0,002	9 138	0	0,002	0,002
Tratamento de Lamas	341 751	12	0,07	0,05	346 517	13	0,08	0,06
Cogeração	82 696	3	0,02	0,01	18 967	1	0,004	0,003
Desodorização	400 526	14	0,08	0,05	377 466	14	0,08	0,06
Gestão Operacional e Outros	4 229	0	0,001	0,001	4 392	0	0,001	0,001
Total (valores estimados)	2 868 955	100	0,64	0,41	2 692 736	100	0,60	0,45
Valores reais	1 968 945	100	0,41	0,41	2 010 175	100	0,45	0,45

¹AdIVT *fide* Marques, 2016

Anexo A2 – Consumos energéticos da ETAR do Seixal em 2013 e 2014.

Etapas de tratamento	ETAR SSB							
	2013				2014			
	kWh ¹	%	kWh/m ³ (estimados pelos dados)	kWh/m ³ (ajustado)	kWh ¹	%	kWh/m ³ (estimados pelos dados)	kWh/m ³ (ajustado)
Pré-tratamento	195 188	19	0,20	0,15	180 035	18	0,19	0,15
Tratamento Primário	12 503	1	0,01	0,01	12 725	1	0,01	0,01
Tratamento Secundário	645 861	62	0,65	0,48	637 962	65	0,66	0,53
Filtração/Desinfeção	565	0	0,001	0,000	561	0	0,001	0,00
Tratamento de Lamas	92 430	9	0,09	0,07	66 505	7	0,07	0,06
Cogeração	39 054	4	0,04	0,03	30 582	3	0,03	0,03
Desodorização	49 798	5	0,05	0,04	58 785	6	0,06	0,05
Gestão Operacional e Outros	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00
Total (valores estimados)	1 035 401	100	1,04	0,77	987 155	100	1,02	0,82
Valores reais	1 035 401	100	0,77	0,77	987 155	100	0,82	0,82

¹AdLVT *fide* Marques, 2016

Anexo A3 – Consumos energéticos da ETAR do Seixal em 2013 e 2014.

Etapas de tratamento	ETAR Strass ^{2,3}	
	kWh	%
Pré-tratamento	933 874	20
Tratamento Primário	-	0
Tratamento Secundário	2 053 594	44
Filtração/Desinfeção	-	0
Tratamento de Lamas	803 782	17
Cogeração	-	0
Desodorização	-	0
Gestão Operacional e Outros	845 597	0
Total (valores estimados)	4 646 140	100
Valores reais	-	100

² Wett *et al.* (2014) *vide* World Water Works, 2013

³ Wett (2016)

Anexo B – Dados de operação das ETAR

Anexo B1 – Dados de operação das ETAR do Seixal e de Sesimbra.

Data	ETAR SSX ¹				ETAR SSB ²			
	Volume tratado (m ³)	População equivalente (hab.)	Carga orgânica (kg CBO ₅)	Energia elétrica (kWh)	Volume tratado (m ³)	População equivalente (hab.)	Carga orgânica (mg/l)	Energia elétrica (kWh)
Jan/13	460 423	111 538	207 460	162 662	83 497	-	243	-
Fev/13	406 814	87 659	147 267	146 118	75 643	-	212	-
Mar/13	505 938	84 323	156 841	177 792	111 901	-	173	-
Abr/13	426 289	87 543	157 577	176 946	101673	-	458	-
Mai/13	406 695	99 229	184 566	173 642	81 859	-	301	-
Jun/13	356 274	89 811	161 660	146 992	77 864	-	538	-
Jul/13	372 588	86 136	160 213	149 956	87 901	-	445	-
Ago/13	362 201	81 448	151 493	162 319	96 901	-	388	-
Set/13	373 786	83 445	150 201	168 246	74 095	-	508	-
Out/13	424 665	99 317	184 729	171 126	74 096	-	312	-
Nov/13	328 021	44 412	79 941	165 532	63 560	-	493	-
Dez/13	378 613	71 079	132 206	173 659	-	-	960	-
Jan/14	369 986	70 204	130 579	175 231	-	-	-	-
Fev/14	425 377	74 940	125 899	156 532	-	-	-	-
Mar/14	359 411	59 695	111 033	170 321	-	-	-	-
Abr/14	348 019	55 671	100 208	163 337	-	-	-	-
Mai/14	332 482	51 474	95 742	159 663	-	-	-	-
Jun/14	220 297	32 305	58 148	142 364	-	-	-	-
Jul/14	300 879	47 922	89 135	162 324	-	-	-	-
Ago/14	312 355	59 771	111 174	183 354	-	-	-	-
Set/14	413 275	42 632	76 737	175 513	-	-	-	-
Out/14	481 053	99 501	185 071	183 025	-	-	-	-
Nov/14	502 299	61 892	111 405	174 428	-	-	-	-
Dez/14	411 942	52 619	97 872	163 826	-	-	-	-

¹AdLVT *fide* Marques, 2016; ² SIMARSUL *fide* Mendes, 2014