



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2017/2018

ESTUDO ENERGÉTICO COMPARATIVO DA ETAR DO AVE

CÁTIA COUTO BRANDÃO

Dissertação submetida para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Cidália Botelho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

Orientador académico: Clito Afonso

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

Orientador na empresa: Engenheira Mónica Jesus

Responsável de Inovação & Desenvolvimento Tecnológico – Águas da Efacec

Julho, 2018

“You cannot get through a single day without having an impact on the world around you. What you do makes a difference and you have to decide what a kind of difference you want to make”

Jane Goodall

RESUMO

As Estações de Tratamento de Águas Residuais requerem uma grande quantidade de energia para reduzir a carga poluente presente nos efluentes, sendo que o consumo energético neste setor tem implicações quer a nível económico como a nível ambiental. Deste modo, as medidas de eficiência energética atraem atualmente uma atenção crescente, visto que permitem reduzir os consumos energéticos da instalação, assim como diminuir as emissões de gases de efeito de estufa e os custos operacionais.

Com a presente dissertação pretendeu-se analisar os consumos energéticos na ETAR do Ave com o intuito de encontrar possíveis ineficiências e também propor medidas para o aumento da eficiência energética adequadas à instalação em estudo.

Assim, este estudo consistiu na análise de todos os quadros elétricos da instalação, de modo a perceber quais as etapas mais intensivas em energia, e na análise das potências de todos os equipamentos presentes na ETAR, para se averiguar quais os equipamentos responsáveis por um maior consumo energético. De seguida, procedeu-se ao estudo do comportamento energético dos 5 principais equipamentos consumidores de energia através de medições efetuadas com um analisador de rede.

Os resultados obtidos permitiram constatar a existência de oportunidades de melhoria no que diz respeito ao funcionamento do parafuso de arquimedes do 1º estágio de elevação, da bomba de recirculação de lamas e do ventilador da desodorização.

Para além dos consumos energéticos da ETAR do Ave também foi analisada a produção de energia elétrica na instalação através da produção de biogás e dos painéis fotovoltaicos recentemente instalados. Comparando os consumos com a energia total produzida chegou-se à conclusão que a energia elétrica gerada na ETAR permite satisfazer 53% das suas necessidades energéticas.

Quanto às sugestões propostas estas incidiram por um lado na redução dos consumos energéticos associados à etapa de arejamento e à desidratação de lamas e por outro no aumento da produção de energia elétrica através da otimização da digestão anaeróbia e da instalação de uma minicentral hidroelétrica no descarregador final da ETAR.

Tendo em consideração as medidas sugeridas e a produção de energia elétrica conseguida pelos painéis fotovoltaicos concluiu-se que a ETAR do Ave poderia aumentar cerca de 39% a sua eficiência energética contribuindo desta forma para a redução da emissão de 31,9 toneladas de CO₂ por mês.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência energética, ETAR, consumo energético, produção de energia

ABSTRACT

Wastewater Treatment Plants require a large amount of energy to reduce the pollutant load present in effluents and energy consumption in this sector has economic and environmental implications. In this way, energy efficiency measures are attracting increasing attention, since they reduce the energy consumption of the plant, as well as reducing greenhouse gas emissions and operational costs.

The aim of this dissertation was to analyze the energy consumptions at Ave WWTP to find possible inefficiencies and propose measures to increase the energy efficiency adequate to the installation under study.

Thus, this study consisted on the analysis of all the electrical switchboards of the installation to understand which are the most energy intensive stages of treatment and the analysis of the powers of all the equipment present in the WWTP in order to determine which equipments are responsible for a higher energy consumption. Next, the energy behavior of the 5 main energy-consuming equipments was studied by measurements performed with a network analyzer.

The results obtained showed the existence of opportunities for improvement in the operation of the Archimedes screw of the first stage of elevation, the sludge recirculation pump and the deodorization fan.

In addition to the energy consumptions of the Ave plant, was also analyzed the production of electricity in the installation through the production of biogas and newly installed photovoltaic panels. Comparing the energy consumption with the total energy produced, it was concluded that the electric energy produced satisfies 50% of the energy needs of the plant.

The proposed suggestions focused on the reduction of energy consumption associated with the aeration stage and sludge dehydration and, on the other hand, on the increase of the electric energy production through the optimization of anaerobic digestion and the installation of a mini hydroelectric plant in the final drainage of the WWTP.

Taking into consideration the suggested measures and the electricity production achieved by photovoltaic panels, it was concluded that Ave's WWTP can increase its energy efficiency by 39%, thus contributing to the reduction of the emission of 31,9 tons of CO₂ per month.

KEY-WORDS: energy efficiency, WWTP, energy consumption, energy production

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer aos meus orientadores. Ao professor Clito pelos seus conselhos e pelo apoio prestado. À Eng.^a Mónica um especial agradecimento por me ter acompanhado ao longo destes 5 meses transmitindo o seu conhecimento e ajudando-me em cada etapa desta jornada.

Ao Eng.^o Vasco Braga por ter disponibilizado toda a informação necessária para o desenvolvimento desta dissertação e pelo tempo despendido a esclarecer todas as dúvidas sobre a operação da ETAR do Ave. Agradeço também a todos os engenheiros e colaboradores do departamento de Ambiente da Efacec que me acolheram e me ajudaram a sentir integrada no seu ambiente de trabalho.

Aos meus amigos que conheci na FEUP, obrigada por me terem proporcionado momentos felizes nestes 5 anos de vida académica, só espero que possamos continuar a criar boas memórias no futuro. Em especial, ao Ricardo e à Patrícia por todo o apoio demonstrado nesta importante fase das nossas vidas.

A todos os professores da FEUP e da Universitat Politècnica de Catalunya pelo conhecimento que me transmitiram ao longo do meu percurso académico.

Não podia deixar de agradecer à minha mãe e à minha irmã por serem o meu grande apoio e me incentivarem a ser melhor dia após dia. Por último, às minhas grandes amigas que são como família, obrigada por sempre me encorajarem a evoluir e a ultrapassar os obstáculos que se cruzam no meu caminho.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS	vii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xv
GLOSSÁRIO.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS	5
2.1.1 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO	5
2.2 CONSUMOS ENERGÉTICOS EM ETAR _s	10
2.2.1 CONSUMOS ENERGÉTICOS DE ETAR _s POR ETAPA DE TRATAMENTO.....	11
2.2.2 CONSUMOS ENERGÉTICOS DE ETAR _s COM DIFERENTES ESCALAS	13
2.3 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	14
2.3.1 UNIDADES DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL.....	14
2.3.2 SISTEMA DE BOMBAGEM	15
2.3.3 SISTEMA DE AREJAMENTO	16
2.3.4 DESINFEÇÃO UV.....	19
2.3.5 AUDITORIAS ENERGÉTICAS	20
2.3.6 SCADA	20
2.3.7 TRATAMENTO ALTERNATIVO - ANAMMOX.....	21
2.4 MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO E PRODUÇÃO DE ENERGIA	23
2.4.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	23
2.4.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	27
2.4.3 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS	30
2.4.4 BOMBAS DE CALOR	32
2.5 AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA	32
2.5.1 EXEMPLOS	33
3 CASO DE ESTUDO.....	35

3.1	ETAR DO AVE	35
3.1.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO	37
3.1.2	DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS DE DIMINUIÇÃO DOS CONSUMOS DE ENERGIA	44
3.1.3	METODOLOGIA.....	46
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	47
4.1	CONSUMO ELÉTRICO POR ETAPA DE TRATAMENTO	47
4.2	POTÊNCIAS DOS EQUIPAMENTOS	49
4.3	DADOS RECOLHIDOS PELO ANALISADOR DE REDE.....	51
4.3.1	SOBREPRESSOR DE ÊMBOLOS ROTATIVOS.....	51
4.3.2	BOMBA CENTRÍFUGA DE RECIRCULAÇÃO DE LAMAS	53
4.3.3	PARAFUSOS DE ARQUIMEDES	54
4.3.4	CENTRÍFUGA	56
4.3.5	VENTILADOR.....	57
4.4	PRODUÇÃO DE ENERGIA NA ETAR DO AVE	58
4.5	INEFICIÊNCIAS ENCONTRADAS	60
4.6	PROPOSTAS DE SOLUÇÕES.....	62
4.6.1	REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO AREJAMENTO	62
4.6.2	OPTIMIZADOR DE SECAGEM DE LAMAS.....	67
4.6.3	HIDRÓLISE TÉRMICA EM CONTÍNUO EXELYS™	68
4.6.4	MICRO CENTRAL HIDRÁULICA	71
4.7	IMPACTO ENERGÉTICO DAS MELHORIAS E SOLUÇÕES PROPOSTAS	72
5	CONCLUSÕES.....	75
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	75
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	79
	ANEXO I: QUADROS ELÉTRICOS.....	85
	ANEXO II: PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS CONSUMIDORES EM ENERGIA	89
	ANEXO IV: RESULTADOS DO ESTUDO DA VALMET.....	93
	ANEXO V: CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA EXELYS™	95

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA DE UMA ETAR CONVENCIONAL	6
FIGURA 2: CONSUMO TÍPICO DE ENERGIA NUMA ETAR POR ETAPA DE TRATAMENTO.	11
FIGURA 3: CONSUMO DE ENERGIA EM RELAÇÃO À ESCALA DAS ETARS NA CHINA.	13
FIGURA 4: CICLO DO AZOTO.	22
FIGURA 5: PLANTA HIDROELÉTRICA INSTALADA A MONTANTE DA ETAR.	29
FIGURA 6: PLANTA HIDROELÉTRICA INSTALADA À SAÍDA DA ETAR.	30
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL MICROBIANA.....	31
FIGURA 8: PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE UMA ETAR AUTOSSUFICIENTE EM ENERGIA.....	33
FIGURA 9: FOTOGRAFIA AÉREA DA ETAR DO AVE.	35
FIGURA 10: ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DA ETAR DO AVE.	37
FIGURA 11: ELEVAÇÃO INICIAL EM 2 ESTÁGIOS	38
FIGURA 12: ETAPA DE DESARENAMENTO E DESENGORDURAMENTO.....	39
FIGURA 13: REATOR BIOLÓGICO.....	40
FIGURA 14: DECANTADOR SECUNDÁRIO.....	41
FIGURA 15: DIGESTORES ANAERÓBIOS.	42
FIGURA 16: GRUPO DE COGERAÇÃO.	43
FIGURA 17: SISTEMA DE DESODORIZAÇÃO.	44
FIGURA 18: ILUSTRAÇÃO EM 3D DA ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES NA ETAR DO AVE.	45
FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DOS CONSUMOS ELÉTRICOS NA ETAR DO AVE.....	48
FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DOS 6 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DA ETAR.	50
FIGURA 21: ANALISADOR DE REDE.....	51
FIGURA 22: SOBREPRESSOR DE ÊMBOLOS ROTATIVOS.	51
FIGURA 23: GRÁFICO REPRESENTATIVO DA VARIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA AO LONGO DO DIA 24 DE ABRIL.	52
FIGURA 24: CENTRÍFUGA.	56
FIGURA 25: GRÁFICO REPRESENTATIVO DA VARIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ENTRE OS DIAS 16 E 20 DE MAIO.	57
FIGURA 26: VENTILADOR.....	57
FIGURA 27: ENERGIA CONSUMIDA VS. ENERGIA PRODUZIDA.....	59
FIGURA 28: DADOS MENSIS DA ENERGIA PRODUZIDA E DA ENERGIA CONSUMIDA NA ETAR DO AVE.	60
FIGURA 29: BALANÇO MÁSSICO NO DECANTADOR PRIMÁRIO.....	65

FIGURA 30: SISTEMA DE HIDRÓLISE TÉRMICA EXELYS™	69
FIGURA 31: CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA COM E SEM A IMPLEMENTAÇÃO DAS MELHORIAS PROPOSTAS.	73
FIGURA IV - 1: RESULTADOS DO ESTUDO DA VALMET.....	93
FIGURA V - 1: CONFIGURAÇÃO HIDRÓLISE-DIGESTÃO.....	95
FIGURA V - 2: CONFIGURAÇÃO HIDRÓLISE PARCIAL-DIGESTÃO.	95
FIGURA V - 3: CONFIGURAÇÃO DIGESTÃO-HIDRÓLISE-DIGESTÃO.	96

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: EXEMPLOS DE ETARs AUTOSSUFICIENTES ENERGETICAMENTE.	33
TABELA 2: POPULAÇÃO E CAUDAL MÉDIO DIÁRIO PARA O ANO HORIZONTE DE PROJETO (HP) 0 E 26.	36
TABELA 3: CONCENTRAÇÕES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DO EFLUENTE.	36
TABELA 4: IMPACTO ALCANÇADO NO CONSUMO ENERGÉTICO APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS PROPOSTAS.	46
TABELA 5: QUADROS ELÉTRICOS EXISTENTES NA ETAR DO AVE E RESPETIVO CONSUMO ENERGÉTICO.....	47
TABELA 6: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA DO SOBREPRESSOR NOS DIAS 24,25 E 26 DE ABRIL.....	52
TABELA 7: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA MÉDIA DA BOMBA CENTRÍFUGA DE RECIRCULAÇÃO DE LAMAS NOS DIAS 1, 2 E 3 DE MAIO.....	53
TABELA 8: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA MÉDIA DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES DO 1º ESTÁGIO NOS DIAS 5, 6 E 7 DE MAIO.....	54
TABELA 9: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA MÉDIA DO PARAFUSO DE ARQUIMEDES DO 2º ESTÁGIO ENTRE OS DIAS 9 E 13 DE MAIO.....	55
TABELA 10: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA MÉDIA DA CENTRÍFUGA ENTRE OS DIAS 16 E 20 DE MAIO.....	56
TABELA 11: ENERGIA CONSUMIDA E POTÊNCIA MÉDIA DO VENTILADOR ENTRE OS DIAS 26 E 28 DE MAIO.....	58
TABELA 12: COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS REAIS E TEÓRICOS RELATIVOS AO AREJAMENTO.....	64
TABELA 13: EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE CBO ₅ . CQO E SST NA DECANTAÇÃO PRIMÁRIA.....	65
TABELA 14: DIFERENÇA DE AREJAMENTO QUANDO A EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE CBO ₅ AUMENTA DE 31 PARA 40%.	67
TABELA 15: IMPACTO MENSAL DAS MELHORIAS SUGERIDAS NO CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	72
TABELA III - 316: DADOS PARA O CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE LAMAS QUÍMICAS.....	92
TABELA I - 1: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 2.....	85
TABELA I - 2: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 3.....	86
TABELA I - 3: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 4.....	86
TABELA I - 4: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 5.....	86
TABELA I - 5: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 6.....	87
TABELA I - 6: EQUIPAMENTOS DO QUADRO ELÉTRICO 7.....	88
TABELA II - 1: EQUIPAMENTOS RESPONSÁVEIS POR UM MAIOR CONSUMO ENERGÉTICO NA ETAR DO AVE	89
TABELA III - 1: DADOS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DA QUANTIDADE DE LAMAS DESPERDIDA DIARIAMENTE.....	91
TABELA III - 2: DADOS NECESSÁRIOS PARA O CÁLCULO DAS NECESSIDADES REAIS DE OXIGÊNIO NO TANQUE DE AREJAMENTO.....	92
TABELA III - 316: DADOS PARA O CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE LAMAS QUÍMICAS.....	92

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Anammox	Processo de oxidação anaeróbica de amónio
BEP	Ponto de melhor eficiência
CBO ₅	Carência bioquímica de oxigénio
CF	Coliformes fecais
CHP	Produção combinada de calor e energia
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CQO	Carência química de oxigénio
CQO _b	Carência química de oxigénio biodegradável
DA	Digestão Anaeróbia
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
GEE	Gases de efeito de estufa
HE	Habitantes equivalentes
HP	Horizonte projeto
MBR	Sistema <i>Membrane Bioreactor</i>
MFC	Célula de combustível microbiana
NMP	Número mais provável
N ₂ O	Óxido nitroso
OD	Oxigénio dissolvido
PE	População equivalente
PN/A	Nitrificação parcial e anammox
SBR	<i>Sequencing Batch Reactor</i>
SCADA	Sistema de controlo de supervisão e aquisição de dados
SST	Partículas sólidas em suspensão
UV	Ultravioleta
Valmet SDO	Otimizador de Secagem de Lamas Valmet
VFD	Unidades de frequência variável

GLOSSÁRIO

Afluente: refere-se à água, água residual ou outro líquido que flui para um reservatório, bacia ou instalação de tratamento, ou qualquer unidade do mesmo.

Águas residuais: vulgarmente denominadas de esgoto, é o termo usado para as águas que, após o uso humano, apresentam alterações nas suas características naturais bem como uma quantidade significativa de poluentes.

Aeróbio: refere-se a um processo que ocorre na presença de oxigênio.

Anaeróbio: refere-se a um processo que ocorre na ausência de oxigênio livre.

Bactérias: são organismos vivos unicelulares, de dimensões geralmente microscópicas, que ajudam a consumir os constituintes orgânicos presentes nas águas residuais.

Biomassa: resultado do crescimento microbiano a partir da decomposição da matéria orgânica.

Biosólidos: sólidos de lama tratada que foram estabilizados para destruir organismos patogênicos.

CBO (Carência Bioquímica de Oxigênio): refere-se ao oxigênio consumido nos processos que decompõem a matéria orgânica da água, sendo, portanto, uma medida da quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nessa água.

Coagulante: produto químico que é adicionado para desestabilizar as partículas coloidais de modo a facilitar a sua aglomeração e consequente remoção.

Eficiência energética: utilização racional e eficiente da energia de modo a reduzir a quantidade de energia necessária a fornecer a um determinado produto ou serviço. As medidas utilizadas para melhorar a eficiência energética pressupõem a adoção de uma tecnologia ou processo de produção mais eficiente ou a aplicação de métodos para reduzir as perdas de energia.

Efluente: refere-se à água, água residual ou outro líquido que sai de um reservatório, bacia ou instalação de tratamento, ou qualquer unidade do mesmo.

Inorgânico: componente que não contém carbono na sua constituição.

Lamas ativadas: processo de tratamento em que se promove o crescimento de microrganismos suspensos na massa de água residual, saturando-a com ar, para que estes degradem a matéria orgânica.

Matéria orgânica: material carbonoso contido em plantas, animais e resíduos.

Sólidos suspensos: pequenas partículas suspensas na água ou águas residuais.

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A água e a energia são recursos fundamentais para a vida e asseguram o desenvolvimento económico e social. Estes elementos estão intrinsecamente ligados entre si, sendo que os impactos sobre um podem afetar o outro. Em todas as etapas de produção de energia é utilizada água, por exemplo, para o funcionamento de turbinas ou para os processos de limpeza de equipamentos. Por outro lado, é necessário gastar energia para extrair, transportar e fornecer água com a qualidade adequada para os diversos usos humanos, assim como para tratar as águas residuais antes do seu retorno ao meio hídrico.[1,2] Devido ao aumento das necessidades destes dois recursos, tornou-se cada vez mais importante compreender o nexo entre a água e a energia, antecipar problemas futuros e implementar políticas, tecnologias e práticas que abordem os riscos associados.[2]

As Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) são um caso típico de interações água-energia.[3-5] Estes sistemas são amplamente implementados na maioria dos municípios com o intuito de reduzir a carga poluente das águas residuais e, conseqüentemente, cumprir com as normas de qualidade de água exigidas pela legislação em vigor em cada país.[5,6] Para alcançar estes objetivos, o setor de águas residuais requer uma grande quantidade de energia para tratar o efluente, principalmente eletricidade, que é utilizada para bombeamento e transporte de águas e também para o funcionamento da maioria dos equipamentos utilizados.[5-8] Trata-se de um fator a melhorar visto que grande parte das ETARs foram projetadas para atingir determinados requisitos de qualidade dos efluentes não tendo em consideração os requisitos energéticos de todo o processo de tratamento.[3,6,9] Deste modo, as ETARs são reconhecidas como os maiores consumidores independentes de energia administrados pelos municípios sendo que na Alemanha, por exemplo, estima-se que as ETARs correspondem a cerca de 20% do consumo total de energia dos seus municípios.[3,7] Contudo, a própria água residual contém quantidades significativas de energia incorporada que normalmente não é utilizada.[2]

Devido ao crescimento populacional e correspondente aumento da carga contaminante a ser tratada, bem como requisitos ambientais cada vez mais exigentes é de esperar um aumento do número de ETARs em todo o mundo e, portanto, um aumento associado do consumo de energia ao longo do tempo.[8,10] Posto isto, a questão da eficiência energética atrai uma atenção crescente tanto do ponto de vista económico como do ponto de vista ambiental dado que uma maior eficiência energética corresponde a um menor consumo de energia, menores emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e também menores custos operacionais.[8,10] Ao nível económico, numa ETAR convencional cerca de 25 a 40% dos custos operacionais são atribuíveis ao consumo de energia.[3,9] Este aspeto é bastante relevante visto que os custos de energia continuam a crescer nos últimos anos. Por outro lado, as ETARs são responsáveis pela emissão de GEE, prejudiciais ao clima, tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), o que causa uma preocupação global.[3, 11,12] Estas emissões resultam principalmente dos processos biológicos e, de um modo indireto, do consumo de energia elétrica ou térmica.[12]

Devido à crescente importância das consequências ambientais e económicas resultantes do consumo de energia, o setor de tratamento de águas residuais tem a responsabilidade de contribuir para a redução das emissões de GEE e do consumo geral de energia.[10] Além disso, existe neste setor um potencial significativo de poupança de energia (cerca de 25%) uma vez que através da utilização da própria tecnologia existente nas ETARs é possível melhorar de forma considerável a eficiência do processo de tratamento e aproveitar a energia incorporada nas águas residuais.[2,3,13] Em certos casos, é possível atingir um ponto de neutralidade energética, isto é, as necessidades energéticas do sistema são inteiramente satisfeitas com a própria produção de energia.[2] Nas últimas décadas, vários municípios da Europa e dos Estados Unidos fizeram grandes avanços no sentido de atingirem a autossuficiência energética.[2] Desta forma, atualmente as águas residuais são consideradas como um recurso para obter energia.[7]

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Com este trabalho pretende-se alcançar os seguintes objetivos:

- Estudar os consumos de energia da ETAR do Ave antes e após a implementação de medidas de otimização da eficiência energética (sobressensores híbridos e painéis solares);
- Comparar os resultados reais obtidos com os expectáveis, tendo por base os dados técnicos dos equipamentos;
- Identificar possíveis ineficiências e oportunidades de melhoria;
- Propor soluções para o aumento da eficiência energética da instalação em estudo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, sendo cada um deles estruturado da seguinte forma:

- No capítulo 1 tem-se o enquadramento, no qual se apresenta a importância do tema em estudo, os objetivos gerais da dissertação e também uma síntese da sua estrutura;
- No capítulo 2 é descrito o estado da arte que se encontra dividido em 5 subcapítulos. Inicialmente, descreve-se os processos de tratamento mais comuns realizados numa ETAR para a fase líquida, sólida e gasosa. No subcapítulo seguinte, consumos energéticos em ETARs, são expostos dados de artigos científicos que mostram a variação dos consumos energéticos por etapa de tratamento e dimensão da planta em estudo. No terceiro e quarto subcapítulo apresentam-se, respetivamente, uma série de medidas de eficiência energética que podem ser implementadas em ETARs assim como medidas de recuperação e produção de energia. No último subcapítulo, referente à autossuficiência energética, apresenta-se exemplos de ETARs existentes a nível nacional e internacional que geram energia suficiente para a sua operação.
- No capítulo 3 descreve-se o objeto de estudo deste trabalho, a ETAR do Ave. Começa com uma breve caracterização geral da planta de tratamento e segue com uma descrição dos tratamentos realizados e das medidas de eficiência energética propostas pela Efacec (empresa responsável pela sua atual gestão). Por fim, expõe-se a metodologia utilizada nesta dissertação para se alcançar os objetivos inicialmente propostos.
- O capítulo 4 consiste, essencialmente, na apresentação e análise dos dados disponibilizados pela Efacec e/ou recolhidos durante a fase de medições e posterior proposta de soluções para a redução dos consumos energéticos na ETAR.
- No capítulo 5 apresenta-se as principais conclusões desta dissertação bem como algumas recomendações futuras relacionadas com o tema.

2

ESTADO DA ARTE

2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

As Estações de Tratamento de Águas Residuais são importantes instrumentos de proteção ambiental. Estes sistemas são destinados a reduzir a carga poluente das águas residuais para que, após o seu tratamento, possam ser devolvidas ao meio recetor em condições ambientalmente seguras.[14] Para tal, uma ETAR engloba uma série de operações e processos de tratamento unitários cujo objetivo é remover contaminantes e também microrganismos patogénicos para atender a qualidade de efluente pretendida.[14,15]

2.1.1 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO

Os poluentes a remover das águas residuais encontram-se na forma dissolvida e/ou suspensa. A separação destes poluentes no decorrer do tratamento dá origem ao efluente tratado, resíduos sólidos (gradados, areias e lamas) e ainda resíduos gasosos (gás sulfídrico, dióxido de carbono, metano, entre outros).[14] Desta forma, o tratamento de águas residuais apresenta três fases distintas de tratamento: [14,16]

- Tratamento da fase líquida: consiste no tratamento da água residual de modo a cumprir as condições exigidas na legislação em vigor para posterior descarga no meio hídrico recetor.
- Tratamento da fase sólida: visa tratar adequadamente os sólidos removidos da água residual na fase líquida; esta fase também pode ser designada por tratamento de lamas.
- Tratamento da fase gasosa: consiste na desodorização dos odores produzidos na ETAR resultantes da degradação da matéria orgânica presente nas águas residuais e, por vezes, a valorização energética do biogás produzido no tratamento de lamas.

Na Figura 1 apresenta-se um diagrama que representa o funcionamento típico de uma ETAR, onde é possível visualizar as várias etapas de tratamento, quer na fase líquida quer na fase sólida.

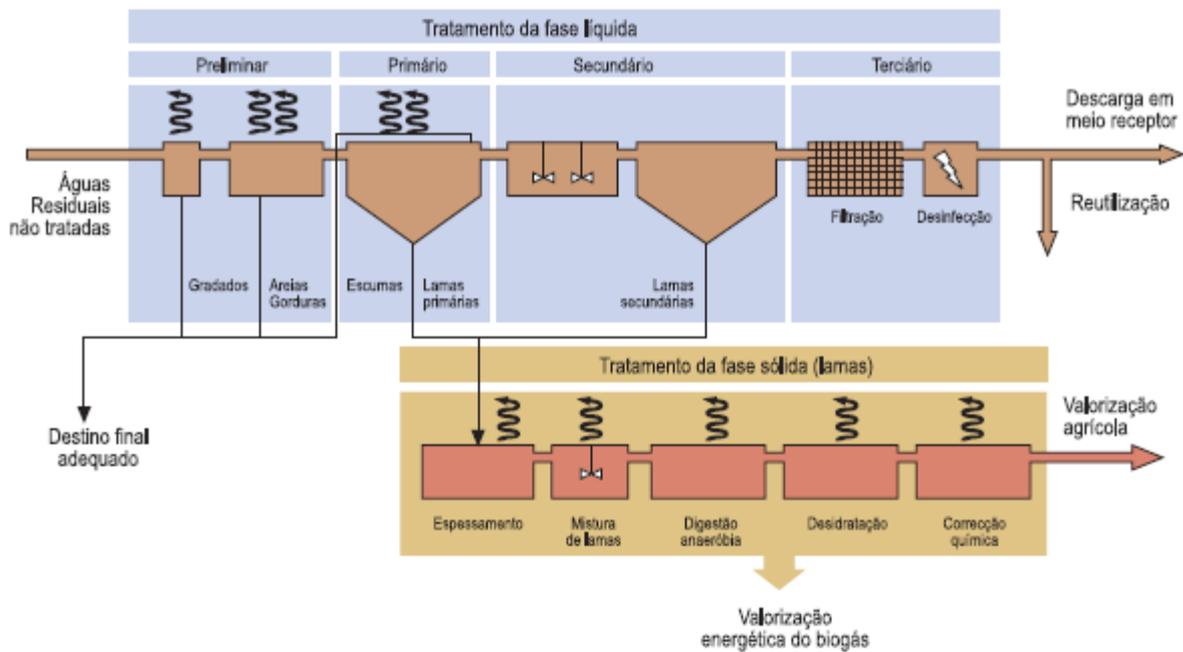


Figura 1:Diagrama de uma ETAR convencional.[16]

2.1.1.1 Tratamento da Fase Líquida

O tratamento da fase líquida é composto por quatro etapas distintas: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário.

Os níveis de tratamento geralmente são estabelecidos pelas características do corpo de água recetor, caso o efluente tratado seja descarregado, ou pelos requisitos para reutilização, caso seja reciclado ou recuperado.[14,15] De forma a assegurar os objetivos de tratamento, existem várias tecnologias e processos disponíveis que serão abordados de seguida.

- Tratamento Preliminar

Após a recolha e elevação inicial do afluente, a primeira etapa de tratamento das águas residuais corresponde ao tratamento preliminar.

O tratamento preliminar consiste num conjunto de processos físicos que têm como objetivo remover materiais grosseiros, areias e gorduras presentes nas águas residuais com o intuito de proteger os elementos e processos de tratamento que se encontram a jusante.[16] Desta forma, evita-se possíveis obstruções ou entupimentos dos circuitos hidráulicos e contaminações das águas e lamas.[14,16,17]

Os principais processos presentes no tratamento preliminar são: gradagem, tamisagem, desarenamento e desengorduramento. Cada um destes processos é indicado para a remoção específica de uma determinada substância ou material.[17]

A gradagem corresponde a um sistema de grelhas que retém sólidos de grandes dimensões presentes nas águas residuais como latas, ramos, folhas, entre outros.[16,17]

Estes sólidos são depois armazenados provisoriamente em contentores para, posteriormente, serem encaminhados para o seu destino final.[16] A tamisagem é utilizada de forma complementar à gradagem apresentando, no entanto, uma malha mais fina que permite remover sólidos de menores dimensões.[16]

A etapa de desarenamento visa remover as areias presentes nas águas residuais que podem causar desgaste mecânico nos equipamentos a jusante.[17] Além disso, esta etapa permite evitar a acumulação de areias nos órgãos assim como eventuais problemas operacionais no decorrer do tratamento biológico.[18] Pode ser realizada de várias formas, sendo que os processos são baseados no facto da areia ser um material mais pesado do que os sólidos orgânicos o que permite que as areias se depositem por gravidade.[16,17] As areias removidas são depois encaminhadas para um classificador de areias.[16,18]

Por último, a operação de desengorduramento tem como objetivo remover gorduras e óleos. Para tal, recorre-se à injeção de um fluxo de ar ascendente, que favorece a flutuação de gorduras até à superfície e sua consequente remoção.[16] Geralmente, são encaminhadas para um concentrador de gorduras e, posteriormente, conduzidas para um destino final adequado. As operações de desarenamento e desengorduramento podem ser realizadas em simultâneo no mesmo órgão de tratamento (desarenadores/desengorduradores).[16]

- Tratamento Primário

Após o tratamento preliminar, as águas residuais ainda contêm material orgânico e inorgânico dissolvido juntamente com sólidos em suspensão.[19]

O tratamento primário pretende remover os sólidos facilmente sedimentáveis através de processo físicos e químicos, tais como sedimentação, coagulação-floculação ou filtração.[14,16,19] Pretende-se com este tratamento reduzir, no mínimo, em 20% a CBO₅ das águas residuais e em 50% o total das partículas sólidas em suspensão (SST).[16]

O princípio da sedimentação consiste na utilização da ação da gravidade para separar e concentrar os sólidos sedimentáveis presentes na água residual.[18] Esta operação realiza-se num decantador onde a água permanece durante um tempo determinado de modo a permitir que as partículas suspensas sedimentem gradualmente no fundo enquanto que os sólidos mais leves flutuam e acumulam-se na superfície do decantador.[16,17] A água clarificada segue para o tratamento secundário, as lamas primárias são encaminhadas para tratamento da fase sólida e os sólidos flutuantes são recolhidos e encaminhados para o concentrador de gorduras do tratamento preliminar.[16]

- Tratamento Secundário

O tratamento secundário tem como intuito remover a matéria orgânica biodegradável solúvel, suspensa e coloidal, que permanece nas águas residuais depois do tratamento primário.[14,15,16] Esta etapa é assegurada por processos biológicos ou por processos físico-

químicos, como a decantação assistida por coagulação-floculação. No entanto, os processos biológicos são mais vantajosos uma vez que proporcionam custos de operação mais baixos e uma menor formação de lamas.[14]

Os processos biológicos podem ser aeróbios (na presença de oxigénio), anaeróbios (sem oxigénio), anóxicos (sem oxigénio dissolvido e na presença de nitritos e/ou nitratos) ou mistos.[16] Utilizando estes processos, é possível remover até 90% da matéria orgânica existente nas águas residuais.[19]

O tratamento secundário convencional inclui tratamento biológico por lamas ativadas, reatores de filme fixo ou sistemas de lagoas, geralmente seguidos por sedimentação.[15]

Os componentes básicos de um sistema de lamas ativadas incluem um tanque de arejamento, onde é fornecido oxigénio necessário para o processo biológico, e um decantador secundário.[14,16] O efluente primário é alimentado continuamente no tanque de arejamento onde os microrganismos metabolizam a matéria orgânica.[16,17] Posteriormente, as águas residuais tratadas fluem do tanque de arejamento para o sedimentador secundário onde ocorre a separação da fase líquida e da fase sólida (lamas secundárias).[16,19] Parte das lamas produzidas no decantador são recirculadas para o tanque de arejamento, de modo a manter constante a concentração de microrganismos, enquanto que as lamas em excesso são removidas e encaminhadas para tratamento da fase sólida.[16,19]

- Tratamento Terciário

A última fase de tratamento das águas residuais consiste no tratamento terciário. Nesta etapa, as águas residuais são submetidas a uma desinfecção e remoção de nutrientes, como azoto e fósforo. Removem-se microrganismos patogénicos, partículas em suspensão, nutrientes em excesso e compostos tóxicos específicos que não foram removidos nos tratamentos anteriores, aumentando o grau de purificação do efluente antes de este ser descarregado no meio recetor.[14,15,16]

Existem várias técnicas que permitem alcançar excelentes resultados no que toca ao grau de qualidade do efluente, tais como a cloragem, ozonização, lâmpadas ultravioleta (UV), microtamisadores ou, a combinação de alguns destes processos.[16]

2.1.1.2 Tratamento da Fase Sólida

Os poluentes sólidos resultantes do tratamento de águas residuais consistem em gradados, tamisados, areias e gorduras, provenientes do tratamento preliminar, e lamas, originárias dos tratamentos subsequentes.[14] Estes resíduos apresentam características bastante distintas pelo que o tratamento, a eventual valorização e o seu destino final tem de ser diferenciado.[14]

Os gradados e tamisados primeiro são compactados, para reduzir o seu volume e teor em água, e depois são enviados para as instalações das entidades gestoras de resíduos sólidos, onde são valorizados em incineradoras ou em aterros.[14]

As areias são lavadas para remoção de partículas orgânicas e, posteriormente, são enviadas para aterro. Por outro lado, podem ser valorizadas, através da sua utilização como material de construção.[14]

As gorduras como são de difícil biodegradabilidade devem sofrer um tratamento mais específico.[14]

As lamas apresentam um elevado teor de humidade, de matéria orgânica e nutrientes, podendo ainda apresentar na sua composição metais pesados e microrganismos patogénicos. Tendo em consideração estas características, devem ser convenientemente tratadas antes de serem enviadas para o destino final para que não surjam problemas ambientais e de saúde pública. Os métodos de tratamento das lamas produzidas na ETAR são divididos em três categorias principais: espessamento, estabilização e desidratação.[16,17]

- Espessamento

As lamas, quando separadas das águas residuais, contêm cerca de 98% de água.[19] Posto isto, o espessamento de lamas é um processo unitário que tem como objetivo aumentar o teor de sólidos reduzindo o conteúdo de água presente nas lamas.[17] Ao reduzir o volume de lamas a tratar nas etapas posteriores reduzem-se os custos de operação e de investimento.[16,17] Além do mais, o espessamento das lamas permite a sua homogeneização e conseqüente otimização do funcionamento dos processos biológicos na digestão de lamas e desidratação.[16]

Os principais processos existentes de espessamento de lamas incluem o espessamento gravítico, o espessamento por flotação e o espessamento mecânico.[16,17]

- Estabilização

Os objetivos da estabilização de lamas são eliminar os organismos patogénicos, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação e controlar odores.[16,17,19]

Os processos de estabilização de lamas podem ser feitos de diversas formas: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, esterilização química com adição de cal, esterilização térmica ou compostagem.[16,17]

- Desidratação

Depois da estabilização, as lamas ainda são principalmente líquidas. Deste modo, a desidratação é usada para retirar o máximo de água presente nas lamas o que facilita o seu manuseio e reduz os custos de transporte para o destino final.[16,17,19]

De forma geral, procede-se à desidratação de lamas através de leitos de secagem de areia ou equipamentos eletromecânicos, tais como filtros banda, filtros prensa ou centrífugas.[16,17,19]

2.1.1.3 Tratamento da Fase Gasosa

Devido à essência dos produtos tratados, uma ETAR é, naturalmente, uma fonte de odores.[18] Estes odores têm origem nos gases ou vapores libertados, essencialmente, nas fases de tratamento preliminar e primário, bem como nas diversas operações do tratamento de lamas.[16,18]

Para controlar a emissão de compostos odoríferos, pode-se recorrer à cobertura parcial ou total da ETAR com aspiração de ar que é depois encaminhado para uma central de desodorização antes da sua libertação na atmosfera.[16]

2.2 CONSUMOS ENERGÉTICOS EM ETARs

Numa ETAR é requerida uma quantidade significativa de energia ao longo de todo o processo de tratamento para melhorar a qualidade das águas residuais o que acarreta elevados custos operacionais.[3,20,21]

Na última década, o consumo de energia neste setor aumentou consideravelmente devido ao aumento do volume de águas a tratar e à implementação de tecnologias mais intensivas em energia para atender aos requisitos de qualidade de efluentes cada vez mais rigorosos.[10,15,20,22] A necessidade futura de remover nutrientes e outros contaminantes emergentes, como produtos farmacêuticos e produtos de higiene pessoal, pode exigir incrementos significativos no consumo de energia nos sistemas de tratamento de águas residuais.[20,23] Por outro lado, as tarifas de energia aumentaram significativamente nos últimos anos e com a contínua flutuação dos preços do petróleo esperam-se novos aumentos nos custos operacionais.[20,24] Face a este problema, muitas instalações de águas residuais procuram reduzir os seus consumos de energia melhorando o desempenho energético da planta.[15] Ao controlar este consumo, para além de reduzir os custos operacionais, pode-se ainda reduzir a emissão de GEE e de outros poluentes.[25]

O indicador mais utilizado na literatura para avaliar o desempenho energético de uma ETAR é o consumo de energia por volume de águas tratada, kWh/m³. [8,21] Como resultado, a energia consumida (no arejamento, mistura, tratamento de lamas, etc.) é considerada proporcional ao fluxo de águas residuais tratadas. Trata-se de uma abordagem muito simples, contudo apresenta limitações quando se pretende fazer estudos de *benchmarking* uma vez que é assumido que as concentrações de poluentes nas águas residuais ou a qualidade do efluente final não variam significativamente entre as ETARs.[8] Uma alternativa seria utilizar como indicador o consumo de energia por unidade de poluente removido (kWh/SST removidos, kWh/CBO removida ou kWh/CQO removida).[8,21] Esta abordagem é mais

correta visto que a remoção de matéria orgânica e nutrientes é o principal contribuinte do consumo de energia nas ETARs, além disso reflete melhor a variação do consumo energético influenciada pela alteração da concentração de poluentes nas águas residuais.[8,21]

2.2.1 CONSUMOS ENERGÉTICOS DE ETAR_s POR ETAPA DE TRATAMENTO

Como mencionado anteriormente, o tratamento de águas residuais é composto por várias etapas de tratamento sendo que cada uma delas apresenta uma taxa de consumo de energia distinta derivada dos tipos de equipamentos instalados.[8] Na Figura 2 é possível visualizar a distribuição usual dos consumos energéticos por etapa de tratamento numa ETAR.

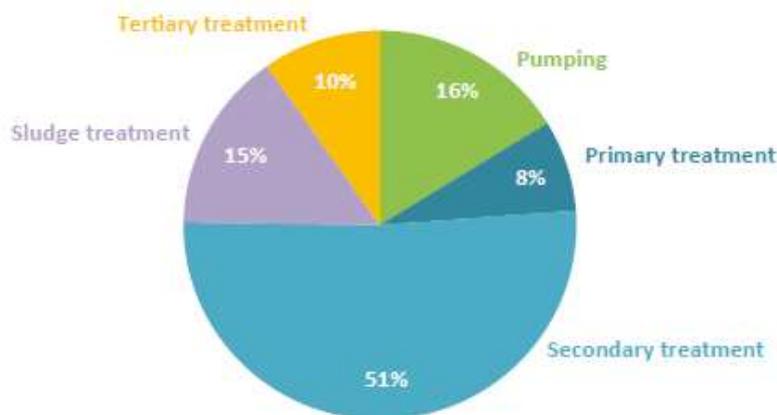


Figura 2: Consumo típico de energia numa ETAR por etapa de tratamento.[2]

De um modo geral, comparando com outras etapas, a recolha de águas residuais e o tratamento primário são as fases menos intensivas em energia.[3,8] Pelo contrário, o tratamento secundário é o maior consumidor de energia, exigindo cerca de 30% a 60% da energia total utilizada na estação de tratamento.[25]

No tratamento preliminar, as várias etapas são responsáveis por apenas uma pequena percentagem do consumo total de energia da ETAR, à exceção do bombeamento que representa, dependendo do tamanho da planta e intensidade do tratamento, entre 5 e 18% do consumo total de eletricidade.[8]

O tratamento primário consiste, na maioria dos casos, num processo simples que ocorre em tanques de sedimentação equipados com pontes raspadoras para remover as lamas primárias. Do ponto de vista energético, o tratamento primário corresponde a uma parcela muito reduzida do uso total de energia.[8]

O tratamento secundário é responsável por uma grande parte do consumo de energia elétrica numa ETAR. No entanto, o consumo de energia nesta fase de tratamento depende principalmente das tecnologias utilizadas.[3,8] Um estudo realizado em várias ETARs na China com diferentes tecnologias de tratamento secundário demonstrou que o consumo

médio de energia num sistema com reator SBR (*Sequencing Batch Reactor*) é 0,330 kWh/m³ enquanto que um tratamento convencional de lamas ativadas apresenta um consumo de 0,267 kWh/m³. [3] Outro estudo indicou que o sistema MBR (*Membrane Bioreactor*) é caracterizado por um elevado consumo de energia (0,38-0,72 kWh/m³), devido às altas taxas de arejamento necessárias, sendo que o seu consumo pode ser o triplo do necessário nos sistemas de lamas ativadas combinados com técnicas avançadas de tratamento, como a filtração terciária. [8]

Num sistema de tratamento convencional de lamas ativadas, o arejamento é o componente de maior consumo de energia. [3,8,11,15,25] Trata-se de um processo que introduz oxigénio dissolvido nas águas residuais com o intuito de suportar a oxidação aeróbia e remover o azoto. [25] O arejamento constitui cerca de 50-65% do consumo total de energia o que equivale à maior fração de custos numa ETAR. [3,11,15,26] Os processos de bombagem, utilizados para fazer circular água e sólidos, também requerem um grande consumo de energia, sendo que juntamente com o arejamento representam cerca de 75% do orçamento de energia total da instalação. [25]

O tratamento terciário para além de aumentar a qualidade dos efluentes aumenta também o consumo de energia. Várias ETARs estão a substituir a desinfecção com cloro pela desinfecção UV pois trata-se de uma técnica mais avançada que não recorre à utilização de produtos químicos tóxicos. [25] O consumo de energia no tratamento terciário varia de acordo com a tecnologia utilizada sendo que, segundo a literatura, para a desinfecção UV este consumo varia de 0,045 a 0,11 kWh/m³ enquanto que o consumo energético associado ao equipamento mecânico de dosagem de reagentes químicos (sais de alumínio ou ferro, reagentes clorados, etc.) varia de $0,9 \times 10^{-2}$ a $1,5 \times 10^{-2}$ kWh/m³. [8]

O tratamento de lamas é outro processo muito intensivo energeticamente, sendo a etapa de estabilização a maior consumidora de energia. [3,8] Na etapa de estabilização as necessidades de energia são comparáveis às do sistema de arejamento do tratamento da fase líquida. Das opções disponíveis, a digestão anaeróbia é a mais eficiente, uma vez que se trata de um processo no qual é possível obter energia elétrica e térmica, através da produção de biogás, e desta forma melhorar o desempenho energético da planta de tratamento podendo até atingir a autossuficiência. [8] A digestão anaeróbia representa cerca de 14% da energia utilizada numa ETAR e, dependendo das características das águas residuais, produz cerca de 0,075 a 0,15 kWh/m³ de energia. [8,24,26] Finalmente, a desidratação das lamas, através de centrifugação, é também um processo responsável por um consumo significativo de energia ($1,8 \times 10^{-2}$ a $2,7 \times 10^{-2}$ kWh/m³). [8]

2.2.2 CONSUMOS ENERGÉTICOS DE ETARs COM DIFERENTES ESCALAS

De acordo com a literatura, o tamanho da ETAR exerce um efeito significativo no consumo de energia sendo que o consumo energético diminui com o aumento das capacidades da planta.[3,8,10,20]

Um estudo realizado, em 2009, a várias ETARs na China de diferentes escalas demonstrou que o consumo de energia unitária diminui de forma exponencial com o aumento do fluxo de entrada na ETAR, como mostra a Figura 3.[3]

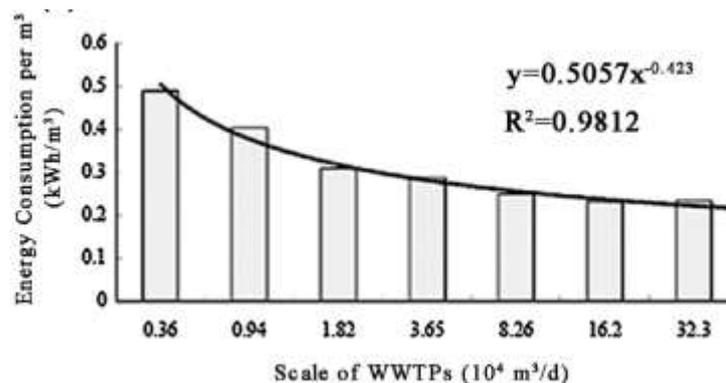


Figura 3: Consumo de energia em relação à escala das ETARs na China.[3]

O mesmo se verificou na Eslováquia em 2011. A partir de dados estatísticos de intensidade energética de 68 ETARs chegou-se também à conclusão de que as grandes unidades de tratamento são mais eficientes energeticamente que as de menores dimensões. As ETARs com entrada diária superior a 5000 m³/dia apresentam um consumo de energia relativamente constante entre 0,331-0,414 kWh/m³. [3]

Todos estes resultados indicam que o consumo unitário de energia nas ETARs diminui com o aumento do fluxo de águas residuais.[3,15] Apesar do aumento do volume de efluente a tratar induzir um aumento dos consumos energéticos há também um aumento da eficiência energética que pode ser devido às seguintes razões:[3,8,20]

- Economias de escala, isto é, utilização de grandes equipamentos mais eficientes;
- Condições mais estáveis no processo de tratamento o que se traduz numa operação mais regular dos equipamentos eletromecânicos e evita períodos de transição intensivos em energia;
 - Automação do processo de tratamento através da regulação dos níveis de oxigénio ou do controlo do funcionamento das bombas;
 - Equipa de operadores bem treinada em comparação com as pequenas ETARs.

Na etapa de projeto, as ETARs são dimensionadas tendo em conta cenários de crescimento populacionais que maior parte das vezes não se verificam em virtude do envelhecimento da população.[21] Além disso, são necessárias grandes margens no dimensionamento do projeto visto que o caudal afluente apresenta variabilidade no fluxo e

nas cargas poluentes com padrões diurnos, semanais e sazonais.[8] Assim sendo, há um sobredimensionamento das ETARs que resulta numa ineficiência do ponto de visto energético devido à instalação de equipamentos com maior potência do que o necessário.[8]

Posto isto, a capacidade de tratamento das ETARs revela-se um fator importante no que toca ao desempenho energético das mesmas, pelo que operações e processos serão mais eficientes quanto mais próximo as ETARs operarem da sua capacidade máxima de tratamento.[21]

2.3 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O aumento dos custos de energia combinado com as preocupações crescentes com as alterações climáticas e emissão de gases de efeito de estufa tem focado cada vez mais a atenção na eficiência energética.[15,20]

Atualmente, muitas estações de tratamento de águas residuais começaram a desenvolver estratégias de gestão de energia e a implementar práticas eficientes em termos energéticos de modo a reduzir o uso de energia nas suas instalações.[15,20,27] Através da escolha de equipamentos e tecnologias mais atuais e eficientes, de modificações operacionais e de programas e práticas que incentivam uma melhor gestão da energia é possível reduzir os requisitos energéticos globais no tratamento de águas residuais.[20,21,27]

Existem várias medidas que permitem melhorar a eficiência energética nas ETARs. Nos pontos seguintes são abordadas as principais oportunidades de melhoria de eficiência energética.

2.3.1 UNIDADES DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

Uma unidade de frequência variável (VFD, *variable frequency driver*) é um controlador eletrónico que varia a frequência de um motor elétrico de modo a controlar a velocidade de rotação do motor.[15,25,26] A VFD permite reduzir a velocidade do eixo do motor às rotações mínimas por minuto necessárias para satisfazer os requisitos de fluxo resultando assim em economia de custos de energia e de manutenção. [15,25,26]

As aplicações de VFD estão a aumentar rapidamente na indústria de águas residuais dado que permitem controlar a energia consumida nos processos de bombeamento e arejamento.[25] Apresentam ainda uma série de vantagens:[15]

- As VFD são especialmente benéficas em grandes aplicações de bombas com um grande número de horas de operação anuais e taxas de fluxo amplamente variáveis, como bombas de reforço.
- Reduzem a velocidade de operação da bomba e o desgaste em rolamentos e eixos é reduzido o que, por sua vez, traduz-se em menores custos de manutenção.

- Pode gerar economias de energia do sistema de bombeamento de 5-50% em relação a outros métodos usados para ajustar o consumo de fluxo variável (por exemplo bypass).

2.3.2 SISTEMA DE BOMBAGEM

Nas ETARs o sistema de bombagem desempenha um papel crucial e representa uma parcela considerável do consumo geral de energia.[13,24] As bombas são utilizadas para reciclar e transportar fluxos de resíduos, sólidos e efluentes tratados para e de uma variedade de processos de tratamento.[20, p. 25]

O desempenho de uma bomba pode diminuir drasticamente devido a vários problemas, como cavitação, sobredimensionamento, desgaste, vazamentos ou bloqueio.[13] Além disso, as ineficiências no bombeamento geralmente resultam da seleção imprópria das bombas, de mudanças nas condições de operação ou da expectativa de que a bomba funcionará numa ampla gama de condições.[20]

Os custos derivados da ineficiência das bombas e do uso de energia podem ser reduzidos através de várias medidas operacionais e de manutenção que permitem detetar possíveis problemas e melhorar a eficiência do sistema de bombagem.[13,26] Segue-se então um conjunto de ações que permitem diminuir a energia necessária para o bombeamento:

- Periodicamente deve-se avaliar o desempenho das bombas existentes para garantir que estas funcionam com a eficiência pretendida.[15,20,24] Este tipo de ação permite identificar oportunidades de redução de energia assim como efetuar uma manutenção preventiva antes da falha da bomba.[15,20] Um bom ponto de partida é determinar a eficiência dos sistemas de bombeamento que operam durante mais horas e com potenciais problemas.[20, p. 27]

- Garantir que as bombas operam perto do seu ponto de melhor eficiência (BEP). No BEP a bomba funciona de forma mais eficiente e o desgaste do equipamento é minimizado.[15,20]

- Substituir as bombas gastas ou ineficientes por uma seleção mais adequada e eficiente que requer menos energia e manutenção.[20,24,26]

- Aumentar o número de bombas de menor capacidade que operam por períodos mais longos e mais próximas do seu BEP em substituição de bombas de grande capacidade que funcionam de forma intermitente e ineficientemente.[20]

- Otimizar o bombeamento através de unidades de frequência variável. Estes sistemas são ideais para bombas que operam em condições amplamente variáveis uma vez que ajustam a velocidade e o uso de energia em tempo real de acordo com a necessidade de bombagem.[15,20,24,26]

- Substituir o impulsor da bomba que pode estar danificado devido a cavitação.[24]

- Os sistemas de revestimento de polímero hidrofóbico e de superfície lisa podem proporcionar um aumento de eficiência de até 5%.[24, p. 36]

- Identificar e ajustar válvulas mal calibradas que diminuem a eficiência da bomba.[26]

Na prática, os sistemas de bombagem são complexos para analisar visto que alguns parâmetros são constantes ou mudam muito lentamente durante um largo período de tempo (número de bombas, elevação e desgaste da bomba) enquanto que outros mudam continuamente (caudal de entrada, temperatura, partículas). Posto isto, o desempenho do sistema da bomba muda diariamente, sendo altamente dependente das condições operacionais.[13]

2.3.3 SISTEMA DE AREJAMENTO

O arejamento é o processo que consome mais energia numa estação típica de tratamento de águas residuais, pelo que para otimizar a energia de uma ETAR deve-se começar por avaliar a eficiência do sistema de arejamento dado que representa a maior oportunidade para minimizar os consumos energéticos e, conseqüentemente, as emissões de GEE e os custos operacionais associados a este processo.[20,24,27]

Muitas plantas apresentam uma capacidade no seu sistema de arejamento superior à necessária visto que foram projetadas tendo em conta o crescimento da população que ainda não ocorreu e que poderá nunca ocorrer.[20,28,29] Noutros casos, mudanças nas indústrias locais ou nos programas de pré-tratamento podem provocar uma diminuição da carga orgânica e, conseqüentemente, dos requisitos de arejamento. Nestas situações, pode não ser possível para o sistema de arejamento existente operar na forma mais eficiente.[20,29]

O primeiro passo para otimizar o arejamento de uma ETAR consiste em minimizar os requisitos de oxigénio dos microrganismos.[28] Os microrganismos requerem oxigénio para degradar a matéria orgânica presente na água residual, para o processo de nitrificação e para a respiração endógena. [24,28] Para que as necessidades de oxigénio dissolvido (OD) sejam satisfeitas em tempo real e de forma eficiente é necessária uma melhor compreensão das exigências de oxigénio da água residual a tratar, não esquecendo que existem flutuações de acordo com a hora do dia.[20] A instalação de controladores automáticos de OD permite a monitorização contínua do nível de oxigénio nas águas residuais para que os sistemas de arejamento possam ser desligados quando são atendidas as necessidades de oxigénio. O controlo automatizado de OD permite assim economizar energia 25 a 40% em comparação com os sistemas de controlo de amostragem manual.[26,27] Posto isto, a incorporação de equipamentos de arejamento de acordo com as necessidades reais gera economias de energia significativas, derivadas da maior eficiência na quantidade necessária de oxigénio.[28, p. 96]

Existem ainda outras alterações que podem ser aplicadas nos equipamentos existentes que permitem uma redução nos custos de energia:[26]

- Otimizar o ponto de ajuste de oxigênio dissolvido para reduzir a quantidade de energia do ventilador. Muitas das vezes os sistemas operam com níveis de OD que excedem a quantidade necessária.
- Ajustar a posição dos sensores de OD para fornecer uma avaliação mais precisa dos níveis de OD.
- Adicionar sondas de OD em diferentes zonas do tanque de arejamento para fornecer leituras mais precisas e otimizar o arejamento em cada zona.
- Ajustar os sistemas de controle para otimizar a mistura mecânica e a difusão de bolhas.
- Substituir os difusores de bolhas grossas por difusores de bolhas finas para aumentar a eficiência da transferência de oxigênio.
- Na zona de arejamento com maior exigência de oxigênio abrir completamente as válvulas para reduzir a pressão nos ventiladores.
- Ajustar a disposição dos misturadores mecânicos para garantir uma transferência de oxigênio mais eficiente.
- Instalar unidades de frequência variável nos misturadores mecânicos para ajustar a velocidade dos motores do misturador e assim corresponder às necessidades do processo em tempo real.

2.3.3.1 Difusores de bolha fina

Os difusores de bolha fina, apesar de mais caros que os difusores de bolhas grossas ou médias, estão amplamente implementados, uma vez que proporcionam uma melhor eficiência de transferência de oxigênio (15 a 40%, [25]) nas águas residuais em comparação com qualquer outro sistema de arejamento (mecânico ou de difusão). [15,20,27] Ao utilizar estes difusores, a quantidade de ar necessária para o tratamento biológico pode ser reduzida sem afetar o desempenho do tratamento. [15]

A principal desvantagem destes sistemas é a sua tendência a obstruir (microrganismos ficam fixos à membrana impedindo a passagem de ar), o que obriga a uma manutenção regular para garantir a sua limpeza e, assim, assegurar o seu bom desempenho. [15,25,29] Contudo, têm-se produzido avanços tecnológicos na área da limpeza dos difusores. De modo a ajudar a prever quando é que estes sistemas necessitam de limpeza foi criado um dispositivo de monitorização on-line. Estima-se que a instalação deste protótipo permitiu uma melhoria da eficiência energética de 15%. [8]

Relativamente à disposição dos difusores, uma abordagem comum é colocar um maior número de difusores na entrada do tanque de arejamento, onde a carga orgânica é superior, reduzindo o número de difusores ao longo do comprimento do tanque assim como a taxa de fornecimento de oxigênio. [20,29]

Se o sistema de arejamento existente estiver com baixo desempenho, os operadores devem examinar a configuração dos difusores para identificar possíveis causas e possíveis melhorias. Mudanças no número ou na configuração dos difusores podem levar ao aumento

da eficiência energética. Por exemplo, uma ETAR em Waco, Texas, não alcançou os seus objetivos de nitrificação com o sistema existente de difusão de bolhas finas. Após uma análise da instalação verificou-se que o sistema estava a operar com excesso de fluxo de ar nos difusores, produzindo bolhas grossas em vez de bolhas finas, o que levou à redução da eficiência da transferência de oxigênio.[20]

2.3.3.2 Ventiladores

Os ventiladores operam de modo semelhante às bombas, transmitindo energia cinética a um fluido, sendo que neste caso o fluido é o ar.[24]

Para melhorar a eficiência dos ventiladores pode-se recorrer às seguintes operações e medidas de manutenção:[20,26]

- Em situações de sobredimensionamento, identificar ventiladores de grandes dimensões e substituir por ventiladores menores e com melhor eficiência.
- Instalar unidades de frequência variável nos sistemas de ventilação centrífuga existentes para ajustar a velocidade do ventilador às necessidades reais do sistema, reduzindo assim o uso de energia quando a demanda de oxigênio é menor.
- Reduzir obstruções, caso existam, no fluxo de ar do ventilador para diminuir a pressão no sistema de ventilador.
- Atualizar para um sistema ventilador-turbo de alta eficiência, que usa motores de alta velocidade e tecnologia para produzir eficientemente o fluxo de ar. Os sistemas de ventilação turbo são normalmente equipados com VFD e são capazes de fornecer uma variedade de fluxos de ar com base no *feedback* do sensor OD.

2.3.3.3 Controlo do processo de arejamento

O controlo do arejamento é fundamental para o funcionamento eficiente das ETARs visto que tanto o arejamento em excesso como o sub-arejamento têm efeitos prejudiciais no processo de tratamento.

Quando se opera em condições de arejamento em excesso há inevitavelmente um desperdício de energia que, por sua vez, aumenta exponencialmente com as crescentes concentrações de OD. Operar em concentrações de OD próximas da saturação aumenta a resistência do oxigênio dissolvido à dissolução o que diminui a eficiência de transferência de oxigênio e aumenta a energia gasta para conduzir o oxigênio na solução. Além do desperdício de energia, há ainda a possibilidade de ocorrer problemas operacionais como por exemplo sedimentação de lamas reduzida e formação de espuma causada por organismos filamentosos. Por outro lado, o sub-arejamento pode conduzir a um baixo desempenho do processo de lamas ativadas, problemas de *bulking* e, em alguns casos, precipitação de fósforo no processamento das lamas resultante da remoção de fósforo biológico indesejável.[20]

Posto isto, é essencial garantir um controlo adequado dos níveis de oxigénio dissolvido para que o sistema de arejamento forneça somente a quantidade de OD necessária. Tal pode ser conseguido através da instalação de sistemas de controlo automatizados que permitem ainda economizar energia. Com o controlo automático, os níveis de OD são alterados constantemente em função do que está a acontecer, no espaço e no tempo. Isso acontece, porque o equipamento mecânico de arejamento ao invés de trabalhar na sua capacidade máxima, é devidamente ajustado ao fluxo de água residual e às cargas orgânicas existentes no sistema.[30] As economias de energia serão específicas da estação de tratamento e são altamente dependentes do sistema de controlo instalado antes da atualização para o controlo automatizado.[20]

2.3.4 DESINFEÇÃO UV

Ao longo dos anos, a radiação UV tornou-se cada vez mais popular como alternativa à desinfeção química.

Os requisitos de energia para a desinfeção UV dependem do número, tipo e configuração das lâmpadas usadas para atingir a dose UV alvo para inativação de microrganismos patogénicos.[20]

As lâmpadas UV de baixa pressão são mais eficientes energeticamente do que as lâmpadas UV de média pressão, visto que estas últimas requerem duas a quatro vezes mais energia do que as lâmpadas de baixa pressão.[20,25] No entanto, a desinfeção com lâmpadas de média pressão apresenta uma maior intensidade e exige um menor número de lâmpadas o que resulta em menores custos de capital e de manutenção.[25]

As lâmpadas de baixa pressão de alto rendimento apresentam as seguintes vantagens:[20]

- Requerem uma menor quantidade de lâmpadas em comparação com as lâmpadas tradicionais de baixa intensidade.
- Os requisitos de energia são menores em comparação com as lâmpadas de média pressão.
- Comparativamente com os sistemas de baixa pressão e baixa intensidade as exigências energéticas são semelhantes. Assim, as lâmpadas de alto rendimento podem ser uma boa opção para reduzir o número de lâmpadas, mantendo os requisitos de energia baixos.

A idade da lâmpada e incrustações na manga de quartzo que envolve a lâmpada, devido ao crescimento de algas, depósitos minerais ou outros materiais, são fatores que afetam a intensidade da radiação UV e conseqüentemente a eficácia dos sistemas de desinfeção. Assim sendo, a limpeza e manutenção das lâmpadas são fundamentais para garantir o melhor desempenho da desinfeção UV podendo resultar em economias significativas de energia. A

maioria dos fornecedores de equipamentos fornece mecanismos de limpeza automática que consistem em limpeza química, limpeza mecânica ou ambos.[20, p. 88]

Sistemas de controlo podem ser projetados para reduzir o número de lâmpadas que funcionam com base no fluxo de tempo real e nos dados característicos das águas residuais, reduzindo o uso de energia e prolongando a vida útil das lâmpadas UV.[20,21]

Futuramente, pretende-se desenvolver um sistema de desinfeção UV que possa ser alimentado por energia renováveis ou baterias aumentando assim a eficiência energética do processo.[15]

2.3.5 AUDITORIAS ENERGÉTICAS

As estações de tratamento de águas residuais mostram um interesse crescente no uso de ferramentas e metodologias que permitem economizar energia, como é o caso de procedimentos de auditoria energética.[8]

As auditorias de energia consistem numa metodologia sistemática que viabiliza a obtenção de conhecimento adequado acerca do perfil de consumo de energia da planta, ajuda a identificar oportunidades de melhorias operacionais assim como a detetar problemas com os equipamentos (envelhecimento e/ou baixo desempenho).[8,22] Assim sendo, a realização de auditorias é considerada uma fase essencial nos programas de conservação de energia uma vez que os resultados obtidos podem contribuir para a melhoria da eficiência das operações e da eficiência energética, o que, conseqüentemente, representa uma oportunidade de redução de custos operacionais, bem como dos impactos no meio ambiente e na comunidade envolvente.[22,27,31]

Em geral, considera-se que a auditoria está dividida em duas fases:[8,31]

- A primeira consiste numa avaliação geral e de identificação de oportunidades. Esta fase é bastante útil para implementar recomendações relativamente simples e imediatamente acessíveis, como mudanças no tempo de operação e atualizações na iluminação, aquecimento e equipamento de bombeamento.
- A segunda fase consiste numa avaliação pormenorizada das oportunidades identificadas e selecionadas. Envolve testes de campo de equipamentos, inventário de dados de desempenho energético do equipamento e discussão de potenciais medidas de conservação de energia.

2.3.6 SCADA

Com o intuito de melhorar a eficiência energética das ETARs pode ser implementado um sistema de monitorização de energia. Consiste num sistema de hardware e software usado para controlar e gerir o consumo de energia, como é o caso, por exemplo, do sistema de controlo de supervisão e aquisição de dados (SCADA).[8]

Os sistemas SCADA são amplamente adotados nas ETARs para ajudar no controlo preciso dos principais equipamentos e processos de tratamento.[8,15] O SCADA apresenta muitos benefícios operacionais, incluindo:

- Fornece dados para otimização do uso de energia e redução de custos associados.[8,20]
- Permite que os operadores compensem o fluxo sazonal e o clima húmido ao ajustar automaticamente os pontos de ajuste.[20]
- Permite a deteção imediata de problemas permitindo um tempo de resposta mais rápido às ineficiências encontradas.[13,20] Por exemplo, caso ocorra alguma falha numa lâmpada de desinfecção UV o operador pode tomar medidas imediatas.[15]
- O controlo avançado no equipamento de arejamento permite monitorizar o oxigénio dissolvido no tanque de arejamento evitando o excesso de arejamento e o consumo excessivo de energia durante períodos de baixo fluxo.[15]
- Fornece ao operador a opção de iniciar e interromper remotamente o funcionamento de determinados equipamentos, que são operados esporadicamente, com base nas necessidades do processo.[15]
- Como são capazes de fornecer dados constantes e em tempo real sobre o consumo de energia de processos e equipamentos, podem calcular indicadores e servir como ferramenta de benchmarking on-line.[8]
- Ferramenta muito económica com um período de retorno entre 2 a 4 anos.[8]

2.3.7 TRATAMENTO ALTERNATIVO - ANAMMOX

Os processos de remoção de azoto (na forma de ião amónio, NH_4^+ , e nitrato, NO_3^-) das águas residuais são cada vez mais importantes, a fim de mitigar o problema ambiental de crescimento excessivo de plantas aquáticas no meio hídrico recetor (eutrofização).[1,32]

Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos novos processos e tecnologias de tratamento para remoção de azoto, que não requerem a adição de matéria orgânica e permitem maximizar a recuperação de energia sem comprometer a eficiência de remoção deste nutriente.[27,33]

A descoberta de bactérias anaeróbias oxidantes de amónio revolucionou a remoção de azoto de fluxos de águas residuais ricos em NH_4^+ . [1,32] O processo de oxidação anaeróbica de amónio (anammox) é um processo biológico capaz de transformar, em condições anaeróbias, NH_4^+ e nitrito (NO_2^-) em gás azoto (N_2) (Figura 4). [3,32]

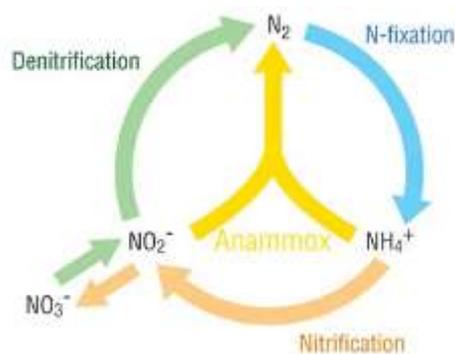


Figura 4: Ciclo do azoto.[34]

Comparativamente com o processo de nitrificação/desnitrificação tradicional, o processo anammox trata-se de uma alternativa que permite reduzir as necessidades de oxigénio (arejamento) até 70% melhorando assim a eficiência energética.[1,3,32] Além desta grande vantagem, permite reduzir em 100% as necessidades de fontes de carbono orgânico e em 90% a produção de lamas no processo o que resulta em menores custos de tratamento de lamas.[32]

O processo de remoção total de azoto amoniacal pelo processo anammox consiste na combinação de nitrificação parcial e anammox (PN/A).[3,32] O processo PN/A consiste então em duas etapas: nitrificação parcial, em condições aeróbias, em que cerca de metade de NH_4^+ é oxidado para NO_2^- e subsequente processo de anammox em que o restante NH_4^+ é oxidado com NO_2^- para gás N_2 sob condições anóxicas. Inicialmente este processo foi aplicado separadamente em dois estágios, no entanto mais tarde os processos de nitrificação parcial e anammox foram introduzidos em reatores de fase única.[32]

Apesar das vantagens já mencionadas e dos imensos estudos realizados nesta área ainda existem limitações na aplicação prática do processo de anammox em ETARs. Um dos maiores obstáculos é o facto das bactérias responsáveis por este processo crescerem muito lentamente (tempo de duplicação varia entre 7 a 14 dias), causando um lento arranque do processo, o que dificulta a transição para sistemas em grande escala.[27,32] Outro desafio na aplicação do processo anammox é a má qualidade da água efluente. Deste modo é necessário um pós-tratamento para melhorar a sua qualidade, o que, obviamente, aumenta o custo de capital e a necessidade de energia.[32] Além disso, o processo anammox foi aplicado exclusivamente ao tratamento de águas residuais ricas em NH_4^+ , como é o caso do efluente do digestor de lamas, mas nunca para o tratamento convencional de águas residuais.[32,33] Posto isto, é indispensável a realização de mais estudos e o desenvolvimento de tecnologias para resolver estes problemas.

2.4 MEDIDAS DE RECUPERAÇÃO E PRODUÇÃO DE ENERGIA

A otimização de energia numa ETAR pode ser obtida reduzindo o consumo de energia elétrica dos diferentes equipamentos, a partir de medidas de eficiência energética mencionadas na secção anterior, mas também através da recuperação de energia da água residual e de outros produtos resultantes do tratamento.[33]

A recuperação de energia nas ETARs envolve a implementação de técnicas ou práticas específicas para capturar energia com posterior reutilização.[15] As estratégias de recuperação de energia podem ajudar a equilibrar o consumo de eletricidade do tratamento de águas residuais. Algumas destas estratégias já se encontram bem instituídas enquanto que outras exigem pesquisa e desenvolvimento adicionais. Os processos e tecnologias já em uso nas ETARs incluem a conversão térmica de biosólidos, produção combinada de calor e energia (CHP) com biogás, fontes de energia renováveis, recuperação de energia à cabeça da planta e nos vários processos de tratamento, etc..[27]

2.4.1 DIGESTÃO ANAERÓBIA

As lamas resultantes do tratamento de águas residuais devem ser tratadas para reduzir odores e eliminar agentes patogénicos e bactérias antes da sua reutilização ou eliminação.[23]

A digestão aeróbia ou anaeróbia são processos comuns usados no tratamento de sólidos, mais precisamente, para estabilizar as lamas nas ETARs. A digestão aeróbia é um processo intensivo em energia visto que utiliza oxigénio para facilitar a digestão do material orgânico.[20,23] Geralmente, produz menos sólidos residuais do que a digestão anaeróbia e é mais fácil de operar, no entanto, além de consumir bastante energia, produz uma lama que é difícil de desidratar e que pode decompor-se causando problemas de odor.[20] Por outro lado, a digestão anaeróbia (DA) é uma tecnologia bem desenvolvida usada para recuperar energia química dos fluxos orgânicos.[27,33] Trata-se de um processo bastante eficiente energeticamente que quebra a matéria orgânica volátil, na ausência de oxigénio, formando biogás (mistura de gases rico em CH₄) e biosólidos (lama tratada). O biogás produzido pode ser capturado para ser utilizado como fonte de combustível para aquecimento dos digestores ou geração de eletricidade.[20,23]

A DA é um processo biológico e, portanto, está dependente do potencial metabólico dos microrganismos e das condições ambientais. Assim, existem vários fatores que podem afetar o desempenho do processo de digestão como é o caso do tipo e concentração do substrato, temperatura, humidade, pH, razão C/N, entre outros.[21] A temperatura é um dos fatores mais importantes. Temperaturas baixas podem inviabilizar o processo, uma vez que originam uma diminuição das taxas de crescimento dos microrganismos, enquanto que temperaturas excessivamente elevadas podem provocar uma redução dos substratos disponíveis e dar origem ao aumento da concentração de amónia que limita a atividade metanogénica.[21]

Posto isto, a DA ocorre geralmente em dois intervalos de temperatura, mesófilos, 32 a 35 °C e termófilos, 50 a 57 °C. Nestas faixas de temperatura, a digestão anaeróbica produz biogás contendo 40 a 75% de metano, sendo 60% de metano a composição típica. [23]

A otimização da digestão anaeróbica é uma prática comum para aumentar a autossuficiência energética das ETARs.[31,35] Neste sentido, podem ser usadas muitas técnicas para aumentar a eficiência da digestão e aumentar a produção de biogás, através, por exemplo, do aumento da concentração de sólidos primários, de uma mistura adequada das lamas ou da otimização da fase de hidrólise.

Dentro do digestor, a agitação das lamas é fundamental para: garantir o correto funcionamento dos processos biológicos, maximizar o tempo de contacto entre a biomassa ativa e o substrato, criar condições químicas e de temperatura homogêneas, diluir influências tóxicas rapidamente, entre outros.[24] Contudo, devido ao elevado volume de lamas a agitar, esta operação requer um oneroso consumo de energia, podendo representar cerca de 10 a 15% do uso de energia numa ETAR.[24,28] Inicialmente, na fase de projeto, a escolha de um equipamento para realizar a agitação que requer um menor consumo de energia é essencial, para atingir uma alta eficiência energética no processo de digestão.[28] No caso de o sistema de agitação já estar implementado, uma forma de otimizá-lo seria através de um estudo de simulação do comportamento das lamas para diferentes condições de agitação, de modo a calcular a potência mínima necessária para ter uma velocidade adequada das lamas dentro do digestor garantindo a inexistência de zonas mortas ou com pouca agitação.[28] Para aumentar a eficiência da mistura podem-se ainda realizar outras melhorias:[26]

- Ajustar os sistemas de mistura do digestor existentes para utilizar o menor número de misturadores possível para uma mistura adequada e um alto volume de gás.
- Melhorar a velocidade do misturador em sistemas com motores controlados por VFD para reduzir o uso de energia.
- Substituir os sistemas de mistura que não funcionam corretamente ou que operam de forma ineficiente com sistemas de eficiência superior.
- Corrigir o fator de potência.

Uma limpeza adequada no digestor também é essencial, pois a existência de matéria inerte no digestor reduz a sua capacidade e, conseqüentemente, diminui o seu tempo de retenção e, portanto, o seu potencial metanogénico. Esta atuação pode levar-se a cabo mediante limpezas tradicionais ou com um equipamento de limpeza em contínuo, baseado num sistema de ciclones para separar a matéria inerte da orgânica.[28, p. 109]

O processo de digestão anaeróbia divide-se em quatro fases independentes: hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese, sendo a hidrólise a fase limitante da reação devido à degradação lenta da matéria orgânica e aos tempos de retenção muito elevados. [21,35,36] Qualquer ação que permite melhorar a cinética da biodegradação anaeróbica das lamas nesta etapa conduz a uma melhoria e aceleração do processo de digestão e, portanto, conduz ao aumento o volume de biogás produzido e à diminuição da quantidade de lamas a

ser eliminada.[28,35,36] Existem vários sistemas de pré-tratamento para alcançar esse efeito: sistemas térmicos (hidrólise térmica), físicos (sistema de ultrassom), elétricos (desintegração da lama a alta tensão), químicos (com ácido sulfúrico, hidróxidos metálicos, ozono, etc.), biológicos (digestão anaeróbica termofílica com baixo tempo de retenção) ou uma combinação entre estes.[28,36] Segundo Longo et al. o sistema de ultrassom aplicado em plantas de grande escala pode aumentar a produção de biogás compensando o gasto de energia extra. A hidrólise térmica também apresenta alto potencial para ser totalmente integrada na ETAR com uma recuperação de energia completa e autossuficiente.[8, p. 1265]

2.4.1.1 Biogás e cogeração

O biogás produzido nos digestores anaeróbicos varia em qualidade devido às condições operacionais e à composição do influente do digestor. Além de metano, pode incluir dióxido de carbono, hidrogénio, azoto, sulfureto de hidrogénio, vapor de água e outros gases.[24] Uma composição típica de biogás inclui cerca de 50-70% de CH₄ e 30-50% de CO₂. [3]

Quando a carga de matéria orgânica nas águas residuais é elevada pode-se extrair uma grande quantidade de energia.[3] A principal fonte de energia numa ETAR é o biogás produzido na DA podendo reduzir cerca de 30% o consumo de energia no tratamento das águas residuais.[3,37] Com o custo crescente da energia e a preocupação com as emissões de GEE, as ETARs tendem, cada vez mais, a utilizar o biogás como fonte de combustível sustentável para produção de calor e energia.[24] Os sistemas de cogeração ou produção combinada de calor e energia (CHP) em ETARs geram energia térmica e eletricidade, em simultâneo, a partir do biogás.[3,15,38]

A nível nacional, muitas ETARs já utilizam a cogeração. A eletricidade produzida é consumida internamente e/ou vendida à rede enquanto que o calor é, essencialmente, utilizado para consumo interno, para aquecimento do digestor anaeróbio, de águas ou aquecimento ambiente.[15,38]

Uma desvantagem da cogeração é que o calor só pode ser usado perto do centro produtor, devido às perdas de energia térmica ao longo das tubagens que dificulta o transporte da energia térmica para grandes distâncias. Assim, muitas das vezes a componente térmica da energia produzida não é totalmente aproveitada.[38]

Outra questão importante é que o biogás também apresenta na sua composição vapor de água e pequenas quantidades de siloxanos e sulfureto de hidrogénio, que devem ser removidos para evitar danos no equipamento de cogeração.[23] Os siloxanos entram na água residual e são transferidos para os digestores com as lamas. A sua acumulação dentro do sistema leva ao aumento do desgaste do motor, aumento dos níveis de silício dentro dos óleos de lubrificação e à obstrução e vedação inadequada das válvulas.[24, pp. 3–24] A remoção de siloxanos e outras impurezas proporciona um aumento da eficiência operacional do

sistema de cogeração, permite obter um combustível mais limpo e, ao reduzir o desgaste do equipamento, diminui a necessidade e custos de manutenção.[24]

2.4.1.2 Codigestão

Nas ETARs, a produção de biogás através da digestão anaeróbia de lamas desempenha um papel essencial para a compensação do consumo de energia na planta. No entanto, apenas 40-50% da fração orgânica das lamas é convertida em metano, resultando numa baixa eficiência da digestão.[39, p. 73] Uma opção atrativa para melhorar o rendimento da DA é a codigestão.

A codigestão é o processo de digestão simultânea de dois ou mais substratos nos digestores anaeróbicos, em que o substrato principal (lamas produzidas na ETAR) é misturado e digerido juntamente com pequenas frações de resíduos orgânicos.[15,24,39,40]

Há uma variedade de resíduos que podem ser utilizados na codigestão sendo que as gorduras, os óleos, bem como os resíduos alimentares são os exemplos mais comuns de resíduos orgânicos adequados.[15] Para a implementação do processo de codigestão os resíduos orgânicos escolhidos como substrato adicional devem garantir um alto teor de carbono e uma alta biodegradabilidade (que irá conduzir a uma produção significativa de biogás), um baixo conteúdo dos nutrientes azoto e fósforo e um baixo teor de materiais inertes, metais pesados, micronutrientes orgânicos e, claro, microrganismos patogénicos de modo a obter um digerido de boa qualidade.[40]

As principais vantagens da codigestão são:

- A adição de resíduos orgânicos com alto potencial metanogénico ajuda a produzir mais biogás e, conseqüentemente, mais eletricidade com apenas um custo adicional marginal.[3,24,33] A eletricidade adicional produzida pode ajudar a cobrir as necessidades energéticas do tratamento de águas residuais a um custo razoável.[24]
- A codigestão de lamas e certos tipos de resíduos orgânicos (por exemplo, soro de queijo ou resíduos de vinagre) pode proporcionar melhores condições de acidificação e diluição o que, posteriormente, pode contribuir para uma melhoria da digestibilidade.[24]
- A DA das lamas juntamente com a fração orgânica de resíduos sólidos municipais e outros fluxos semelhantes, como resíduos originários de cantinas e restaurantes, resíduos industriais de alimentos ou frutas e vegetais, trata-se de uma estratégia que tanto permite a recuperação de energia na ETAR, como a eliminação adequada dos resíduos orgânicos, beneficiando claramente o meio ambiente.[40]

Apesar dos potenciais benefícios, a codigestão pode exigir instalações adicionais, pode aumentar a quantidade de sólidos nas instalações de desidratação ou ter impactos nos requisitos de mistura e aquecimento, bem como na qualidade dos biosólidos produzidos.[24]

Numa ETAR de 95.000 habitantes equivalentes (HE) em Rovereto, Itália, estudou-se durante 18 meses os efeitos da codigestão de lamas mistas com a fração orgânica de resíduos

sólidos municipais. O tratamento de 10.000 kg/dia de resíduos orgânicos permitiu aumentar a taxa da carga orgânica o que gerou um aumento substancial na produção de biogás de 1321 a 2723 m³/d. Associado a isto, houve um aumento na recuperação de energia, passando de 3900 kWh/dia (apenas tratamento de lamas) para 7800 kWh/dia (codigestão). Em suma, o estudo demonstrou que a implementação do regime de codigestão permitiu a eliminação adequada dos resíduos orgânicos enquanto recuperava energia renovável em níveis semelhantes aos necessários para tratamento de águas residuais.[40]

De um modo geral, os estudos realizados nesta área são a nível laboratorial ou em escala piloto onde os resultados são depois extrapolados para escalas superiores, enquanto que os estudos executados em grande escala são mais escassos e/ou ocorrem por períodos muito limitados não sendo possível retirar grandes conclusões.

2.4.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Tendo em conta as necessidades energéticas de uma ETAR, as energias renováveis apresentam outra possibilidade de reduzir os custos de energia. O aproveitamento de energias renováveis como a energia eólica, solar e hídrica tem ganho cada vez mais relevância uma vez que estes sistemas contribuem para maximizar a produção de energia na ETAR.[3,15,21,31]

Os custos destas tecnologias podem ser um fator limitante na sua aplicação. No entanto, as fontes de energia renovável podem ser economicamente viáveis se forem utilizadas para aumentar a energia elétrica da rede durante os períodos de pico.[15]

As fontes de energia renováveis têm sido utilizadas direta ou indiretamente no tratamento de águas residuais.[27] Como as ETARs encontram-se por norma situadas em regiões de baixa elevação o aproveitamento da energia eólica é difícil.[3] Deste modo, serão apenas abordadas a energia solar e a energia hidroelétrica.

2.4.2.1 Energia solar

A energia solar pode ser aproveitada, direta ou indiretamente, para o tratamento de águas residuais.

O aproveitamento direto, através da utilização da ação dos raios solares nos processos de tratamento, deve ser analisado durante o projeto das instalações da ETAR e pode ser feito através das seguintes formas:[31]

- Utilização do poder germicida dos raios solares no tratamento de desinfecção de águas residuais, por exemplo em lagoas de maturação.
- Aproveitamento da ação dos raios solares em tratamentos naturais, como as lagoas de plantas e os tratamentos baseados na utilização de algas em biorreatores.

- Utilização do calor dos raios solares na evaporação da água intersticial das lamas do tratamento, em leitos de secagem e em secadores solares.

Paralelamente, o aproveitamento indireto da energia solar consiste na utilização da energia elétrica produzida através de painéis fotovoltaicos.[31] 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.[21, p. 30]

A produção de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos apresenta uma série de vantagens:[21,31]

- Reduz a dependência dos combustíveis fósseis uma vez que a energia solar é uma energia renovável e gratuita.
- A energia solar apresenta uma reduzida pegada carbónica (50 g/kWh versus 950 g/kWh da produzida a partir de origens fósseis) e não produz emissões de GEE durante a fase de produção de energia elétrica.
- A instalação dos painéis solares é fácil e os custos de operação e manutenção são considerados baixos em comparação com as tecnologias concorrentes.
- A instalação dos painéis fotovoltaicos não implica alterações significativas nas instalações existentes, podendo ser instalados nos telhados dos edifícios ou sobre a superfície do solo.
- Caso se pretenda alcançar um aumento da energia produzida pode-se recorrer somente a um incremento de novos módulos.
- Estes sistemas operam na presença de irradiação solar direta e difusa.
- Os projetos de energia solar podem receber ajudas e incentivos por parte do Estado.
- Graças à forte redução dos preços da tecnologia apresenta uma competitividade crescente face a outros tipos de energia.
- Solução eficaz para colmatar os picos de consumo energético.

Porém, o aproveitamento de energia solar em ETARs pode deparar-se com algumas dificuldades:[21,31]

- A eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica é ainda muito baixa (cerca de 20%), comparativamente com outras energias renováveis, exigindo por isso grandes áreas de implantação. Esta eficiência diz respeito à percentagem de energia solar que incide nos painéis que é convertida em eletricidade passível de ser utilizada. Um dos fatores que influencia a eficiência de conversão é a temperatura. O sistema opera melhor a temperaturas mais reduzidas enquanto que temperaturas mais elevadas fazem com que as características do semicondutor se alterem podendo ainda danificar a célula e outros aparelhos reduzindo o tempo médio de vida útil do sistema.
- O aproveitamento desta fonte de energia pressupõe a existência de radiação solar, pelo que durante a noite ou em dias nublados e/ou chuvosos há intermitências no

funcionamento dos painéis. Isto pode implicar a necessidade de uma fonte de energia de apoio ou de uma forma de armazenamento de energia (baterias).

- A instalação destes sistemas exige um investimento inicial elevado devido à aquisição e instalação de painéis PV, inversores, controladores de carga e baterias (opcionais). Além disso, dada a fragilidade dos painéis PV, é importante investir em seguros para salvaguardar o investimento, o que implica custos adicionais. No entanto, este investimento é recuperado na fase de operação graças às poupanças energéticas que permite alcançar.

2.4.2.2 Energia hidroelétrica

A energia hidroelétrica é obtida através do aproveitamento da energia potencial gravítica da água que é convertida em energia cinética através do movimento de turbinas ou outros sistemas mecânicos. Posteriormente, esta energia é convertida em energia elétrica recorrendo a um gerador.[41] A energia elétrica obtida é diretamente proporcional ao caudal e à altura da queda de água.[41,42]

Em várias estações de tratamento de águas residuais existe a possibilidade de realizar explorações mini ou micro-hidráulicas.[42] Existem duas formas de aproveitar a energia hidroelétrica nas ETARs:

- A turbina encontra-se a montante da estação de tratamento aproveitando-se o declive existente entre a rede e a instalação (Figura 5). Neste caso, opera-se com água residual logo a turbina deve ser selecionada de modo a suportar as impurezas presentes na água ou antes da chegada à turbina a água residual deve sofrer um pré-tratamento.[42]

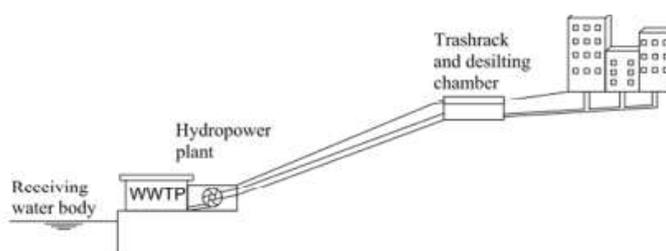


Figura 5: Planta hidroelétrica instalada a montante da ETAR. [43]

- A turbina é implementada na zona de descarga do efluente tratado para o meio recetor (Figura 6). Neste caso, é importante determinar as condições de fluxo assim como a altura de queda.[42] A instalação da unidade hidroelétrica dentro da ETAR, por exemplo entre o tratamento preliminar e o tratamento primário, é difícil devido às propriedades das águas residuais (composição química, pH) que requerem requisitos avançados nos materiais da turbina, especialmente no que diz respeito à resistência à corrosão.[44]

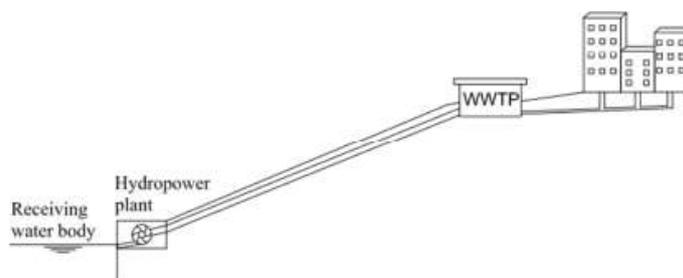


Figura 6: Planta hidroelétrica instalada à saída da ETAR. [43]

O aproveitamento da energia hidroelétrica em plantas com elevados caudais e/ou grandes alturas de queda, através de turbinas hidráulicas, é um método viável que permite, de uma forma simples, economizar custos de energia bem como diminuir as emissões de CO₂. [44,45] Além disso, tem a vantagem de poder ser executada durante quase todo o ano, independentemente das condições climáticas e, portanto, é muito mais eficiente energeticamente do que os sistemas de aproveitamento de energia solar ou eólica. Possui ainda uma longa vida útil, apresenta baixos custos operacionais e de manutenção e nenhum impacto ambiental visto que, ao contrário das grandes centrais hidroelétricas, não causa a destruição do ecossistema do rio ou interferência na migração dos peixes. Contudo, esta tecnologia ainda é pouco estudada, comparativamente com as grandes hidroelétricas, e encontra-se em fase de desenvolvimento. [41] Além disso, a instalação de turbinas em ETARs nem sempre é rentável devido à reduzida altura de queda de água ou à variação sazonal do fluxo que afeta o desempenho da turbina, a potência e o período de retorno do investimento. [46]

2.4.3 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS

Uma célula de combustível microbiana (MFC) converte a energia química armazenada nos compostos orgânicos presentes nas águas residuais em energia elétrica por via de reações catalíticas operadas por microrganismos que, agregados em biofilmes, crescem em condições anaeróbias sobre elétrodos. [1,3,15,47,48]

A Figura 7 representa um esquema de uma MFC composta por duas câmaras, anódica e catódica, separadas por uma membrana de troca de prótons.

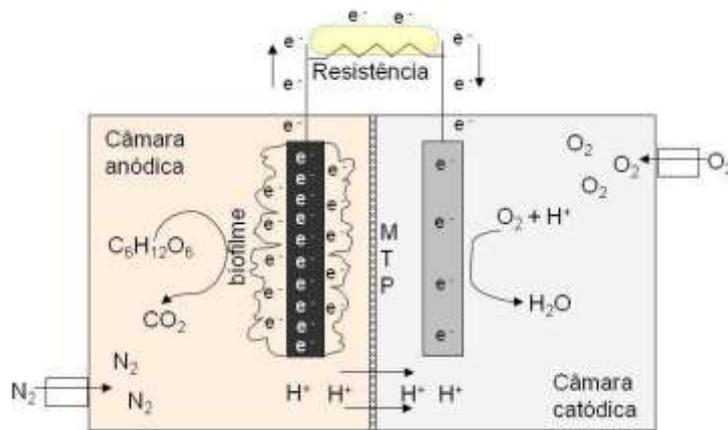


Figura 7: Representação esquemática de uma célula de combustível microbiana.[48]

Os substratos orgânicos são oxidados, no ânodo, pelos microrganismos e produzem-se elétrons, prótons e CO_2 . Os elétrons são transferidos para o cátodo através de um circuito externo que faz ligação entre o ânodo e o cátodo.[1,47,48] Os prótons migram para a câmara catódica, através de uma membrana de troca de prótons, onde se combinam com o oxigênio para formarem água.[47,48] A geração de corrente elétrica é possível por existir uma resistência entre os elétrodos que promove uma diferença de potencial convertida em corrente elétrica.[48, p. 2]

A vantagem desta tecnologia é a sua capacidade de tratar a água com um mínimo de entrada de energia e, em alguns casos, com a saída de energia positiva líquida.[1] Além disso, ao contrário da digestão anaeróbia, a MFC gera eletricidade diretamente, o que representa uma grande vantagem dado que a combustão do biogás e a conversão em eletricidade apresenta num baixo rendimento, desperdiçando até 70% da energia contida no biogás.[3]

Esta tecnologia tem vindo a ser utilizada com sucesso em estudos de escala piloto para o tratamento de águas residuais, no entanto ainda se encontra em fase de desenvolvimento precoce.[1,47,48] Os principais desafios incluem:[1]

- Compreender o efeito da temperatura e da população bacteriana na produção de energia líquida para diferentes águas residuais.
- Desenvolver materiais (elétrodos e membranas) de menor custo e duráveis, compatíveis com os microrganismos, de forma a manter ou melhorar a eficiência.
- Efetuar testes em sistemas de maior escala com águas residuais reais para avaliar o seu desempenho a longo prazo.

Vários estudos demonstram que sistemas de MFCs permitem produzir energia elétrica durante o tratamento simultâneo de águas residuais. No entanto, a MFC como tecnologia de tratamento autónoma pode não ser suficiente para alcançar uma alta eficiência de tratamento. Posto isto, avanços recentes na melhoria do desempenho energético das MFCs centram-se na sua combinação com processos de tratamento de membrana. Por exemplo, um estudo

realizado em escala de laboratório mostrou que um sistema de tratamento de águas residuais em duas etapas, composto por MFCs e um MBR de leito fluidizado anaeróbio, operado por 50 dias, pode alcançar a independência energética, visto que a energia total necessária para operação do sistema é 0,0186 kWh/m³ e a produção de energia pelos MFC foi de 0,0197 kWh/m³. [3]

2.4.4 BOMBAS DE CALOR

Outra importante fonte de energia contida nas águas residuais é a energia calorífica. [3,11] Com o auxílio de uma bomba de calor é possível extrair efetivamente o calor contido no afluente e/ou efluente. [11,49] Em comparação com as águas residuais brutas (afluente), a utilização da energia térmica presente no efluente tem a vantagem de reduzir consideravelmente o risco de obstrução e corrosão no equipamento da bomba. [11] Além disso, as temperaturas mais baixas da água efluente reduzirão o impacto no meio aquático. [3, p. 8]

De modo a aproveitar a energia térmica das águas residuais de forma económica e ecológica devem ser cumpridos alguns requisitos: [50]

- Fluxo mínimo de águas residuais de 15 L/s.
- Demanda de calor mínima de 100 kW.
- Distância curta entre a fonte de calor e o dissipador de calor.
- Alto desempenho de operação das bombas de calor.

As ETARs são locais ideais para a utilização de bombas de calor pois geralmente apresentam fluxos de águas residuais estáveis e a uma temperatura relativamente alta. [11,49] Assim, a energia térmica recuperada pode ser utilizada na ETAR para aquecimento e/ou arrefecimento, nomeadamente para aquecer os digestores anaeróbios, para arrefecer o ar interior no verão ou, por exemplo, para a secagem de lamas. [11,49] No entanto, de um modo geral, a energia térmica produzida a partir dos processos de tratamento é muito maior do que as necessidades da planta, logo é importante recomendar consumidores alternativos desta energia, através por exemplo da venda fora do local. [3,49]

2.5 AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Nos últimos anos tem-se investido na alteração do paradigma atual nas ETAR, transformando-as de consumidores de energia em produtores, dado que têm o potencial de se tornarem autossuficientes em energia através de uma combinação de medidas de recuperação de energia e de eficiência energética. [3,21,27] Apesar de ser um objetivo alcançável, poucas ETARs atingem a neutralidade energética e de carbono devido à existência de limitações tecnológicas e questões de proteção ambiental. Por exemplo, as tecnologias anammox foram desenvolvidas em 1977, mas a aplicação principal dessas

tecnologias ainda está em fase de testes e investigações. O custo também é um fator que dificulta a criação de ETARs autossuficientes uma vez que é necessário um grande investimento inicial, em comparação com as ETARs convencionais, devido à implementação de tecnologias, como CHP e fotovoltaica.[3]

Assim, para promover o desenvolvimento de ETARs autossuficientes energeticamente uma avaliação teórica é necessária, tanto para novos projetos como para melhoria de ETARs já existentes. Esta avaliação deve contemplar uma análise de balanço energético, para escolher as tecnologias mais apropriadas, assim como uma análise do investimento inicial e custo-benefício, como mostra a figura seguinte.[3]

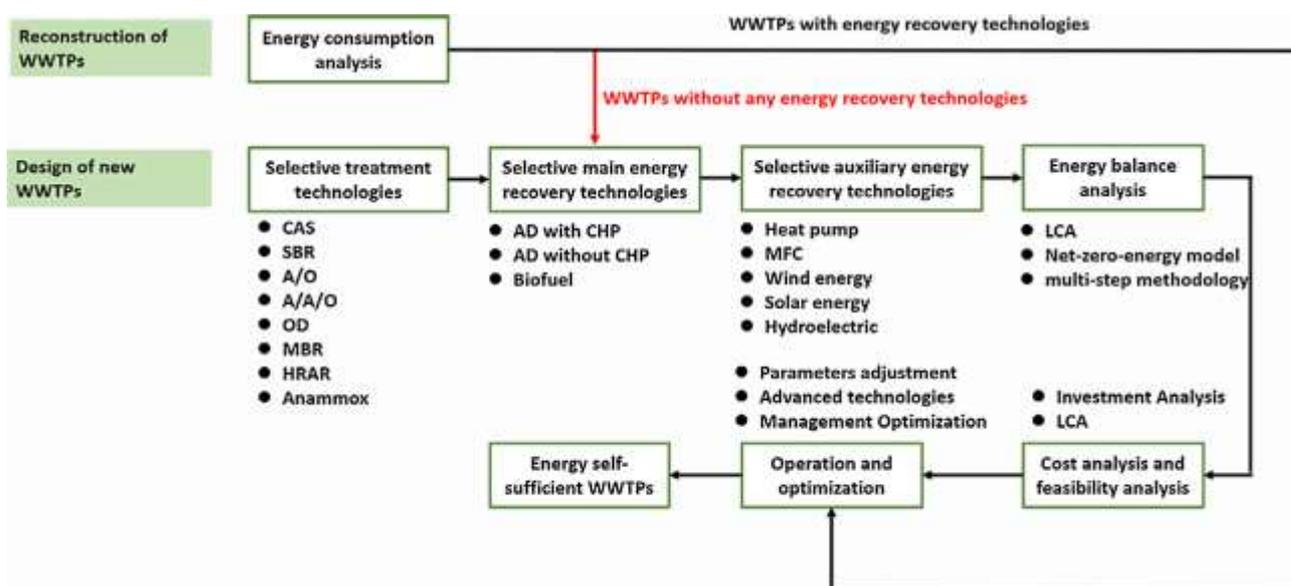


Figura 8: Processo de construção de uma ETAR autossuficiente em energia.[3]

2.5.1 EXEMPLOS

Na Tabela 1 estão indicadas 12 ETARs, presentes na Europa e América do Norte, que alcançaram autossuficiência energética (superior a 90%).

Tabela 1: Exemplos de ETARs autossuficientes energeticamente. Adaptado de [3]

Nome	Localização	Capacidade (MGD)	Autossuficiência energética (%)
Grevesmuhlen	Alemanha	4	>100
Wolfgangsee-Ischl	Áustria	5	>100
Strass im Zillertal	Áustria	6	>100
Gloversville-Johnstown Joint	EUA	11	100
Sheboygan Regional	EUA	11	100
Gresham	EUA	13	100

Tabela 2: Exemplos de ETARs autossuficientes energeticamente. Adaptado de [3] (continuação)

Nome	Localização	Capacidade (MGD)	Autossuficiência energética (%)
Prague Central	República Checa	42	94
Zurich Werdholzli	Suíça	67	100
East Bay Municipal Utility District	EUA	70	>100
Point Loma	EUA	175	100
Davyhulme	Inglaterra	200	96
Joint Water Pollution Control Plant	EUA	300	97

A ETAR East Bay Municipal Utility District, com 70 MGD de capacidade de tratamento (equivalente a cerca de 265.000 m³/dia) tornou-se em 2012 a primeira ETAR da América do Norte a produzir mais energia renovável do que a necessária para operar a instalação. A codigestão com resíduos alimentares, resíduos de vinícolas e gorduras permite melhorar a produção de biogás em quase 70% e a instalação de uma turbina a gás de baixo consumo de energia complementada com 3 motores de 2,1MW permitem a geração de cerca de 10MW de energia elétrica.[3,51] No total a eletricidade produzida é de 126% da demanda elétrica da ETAR, o que significa que o excesso de eletricidade produzida pode ser vendida à rede.[3]

A ETAR de Sheboygan utiliza um processo de lamas ativadas para alcançar o tratamento secundário de águas residuais e produz cerca de 90% da sua energia elétrica anual e 85% das suas necessidades anuais de calor no local, utilizando um programa de codigestão que cria 700 kW de capacidade de cogeração.[3]

As ETARs de Strass e Wolfgangsee-Ischl, na Áustria, produzem energia elétrica através do biogás da digestão anaeróbia de lamas que é depois utilizada no arejamento e agitação do tanque de arejamento e outros processos de tratamento, sendo que a energia em excesso é vendida à rede.[3]

Portugal apresenta também uma ETAR autossuficiente energeticamente. A ETAR da Guia é a primeira ETAR portuguesa autossuficiente em energia, apresentando uma capacidade de tratamento de 150.000 m³/dia de águas residuais, sendo a maior instalação do país.[52,53] Esta ETAR tem um sistema de cogeração que se baseia no aproveitamento do poder calorífico do biogás, gerado na digestão anaeróbica de lamas, para produzir energia elétrica.[53] Deste modo, com a cogeração bem como a implementação de outras medidas, a ETAR passou de um consumidor intensivo de energia externa a autossuficiente em energia permitindo poupar cerca de 1 milhão de euros por ano em energia.[52]

De um modo geral, todos os sistemas apresentam potencial de serem otimizados para recuperar e economizar grandes quantidades de energia. De acordo com um estudo sobre a melhoria da eficiência energética de 14 ETARs portuguesas, por exemplo, a eficiência de poupança de energia pode variar entre 20% e 40%.[3]

3

CASO DE ESTUDO

3.1 ETAR DO AVE

A ETAR do Ave, que entrou em arranque no ano 2010, localiza-se na freguesia de Tougues, concelho de Vila do Conde, e serve a população de grande parte das freguesias de Vila do Conde e Póvoa de Varzim. Esta estação, ilustrada na Figura 9, baseia-se num tratamento secundário por lamas ativadas, realizada em 3 reatores biológicos, com remoção de azoto, antecedidos de tratamento preliminar e decantação primária lamelar. A jusante, tem ainda implementado o processo de microtamisação e desinfecção com lâmpadas UV antes do efluente ser descarregado para o meio hídrico. Quanto às lamas primárias e secundárias, produzidas durante o tratamento da fase líquida, estas são sujeitas a um processo de espessamento seguindo depois para uma etapa de digestão anaeróbia a quente, com aproveitamento de biogás em sistema de cogeração e, por fim, desidratação mecânica.[18]



Figura 9: Fotografia aérea da ETAR do Ave.[54]

Face à proximidade de zonas balneares, a ETAR do Ave apresenta um aumento no fluxo de águas residuais afluentes durante o verão, correspondendo então à época alta. Assim, a planta foi projetada tendo em conta as variações nas condições de afluência ao longo das fases do projeto e das diferentes épocas do ano.[18] Na tabela seguinte são apresentados os dados referentes à população abrangida e ao caudal médio diário para o ano 2010 e 2036, tanto para a época alta como para a época baixa.

Tabela 3: População e caudal médio diário para o ano horizonte de projeto (HP) 0 e 26.

	2010 (Ano HP 0)		2036 (Ano HP 26)	
	Época alta	Época baixa	Época alta	Época baixa
População equivalente (PE)	89.909	62.979	257.557	183.907
Caudal médio diário (m ³ /dia)	14.839	10.521	42.935	30.456

A ETAR do Ave foi dimensionada para o ano horizonte 2036 tendo em consideração um cenário de crescimento da população e consequente aumento das cargas orgânicas das águas residuais afluentes. Contudo, devido ao grande espaço temporal entre o ano de construção e o ano horizonte, atualmente, a ETAR encontra-se sobredimensionada em termos volumétricos, funcionando desta forma em regime de alta capacidade que não corresponde à realidade. Assim, por exemplo, das 3 linhas de tratamento biológico existentes apenas uma se encontra em operação. Houve, portanto, um grande investimento em equipamentos que neste momento não estão a ser utilizados.

O rio Ave é o meio hídrico onde é descarregado o efluente final tratado. Dadas as suas características realiza-se entre 1 de junho e 30 de setembro a desinfecção da totalidade do efluente final da ETAR de modo a garantir a sua qualidade bacteriológica. De acordo com o Decreto-lei n.º 236/98 de 1 de agosto, relativo à qualidade das águas recetoras, e o Decreto-lei n.º 152/97 de 19 de julho, relativo às descargas de águas residuais em meios aquáticos, os objetivos de tratamento definidos para a ETAR do Ave para os principais parâmetros de qualidade do efluente encontram-se na Tabela 3.[18]

Tabela 4: Concentrações dos principais parâmetros de qualidade do efluente.

Parâmetro	Concentração
CBO5 (mg O ₂ /L)	25
CQO (mg O ₂ /L)	125
SST (mg/L)	35
Fósforo total (mg/L)	10
Azoto total (mg/L)	15
CF (NMP/100 mL)	2000

3.1.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

O esquema representado na Figura 10 ilustra as principais operações realizadas na ETAR do Ave para cada linha de tratamento.

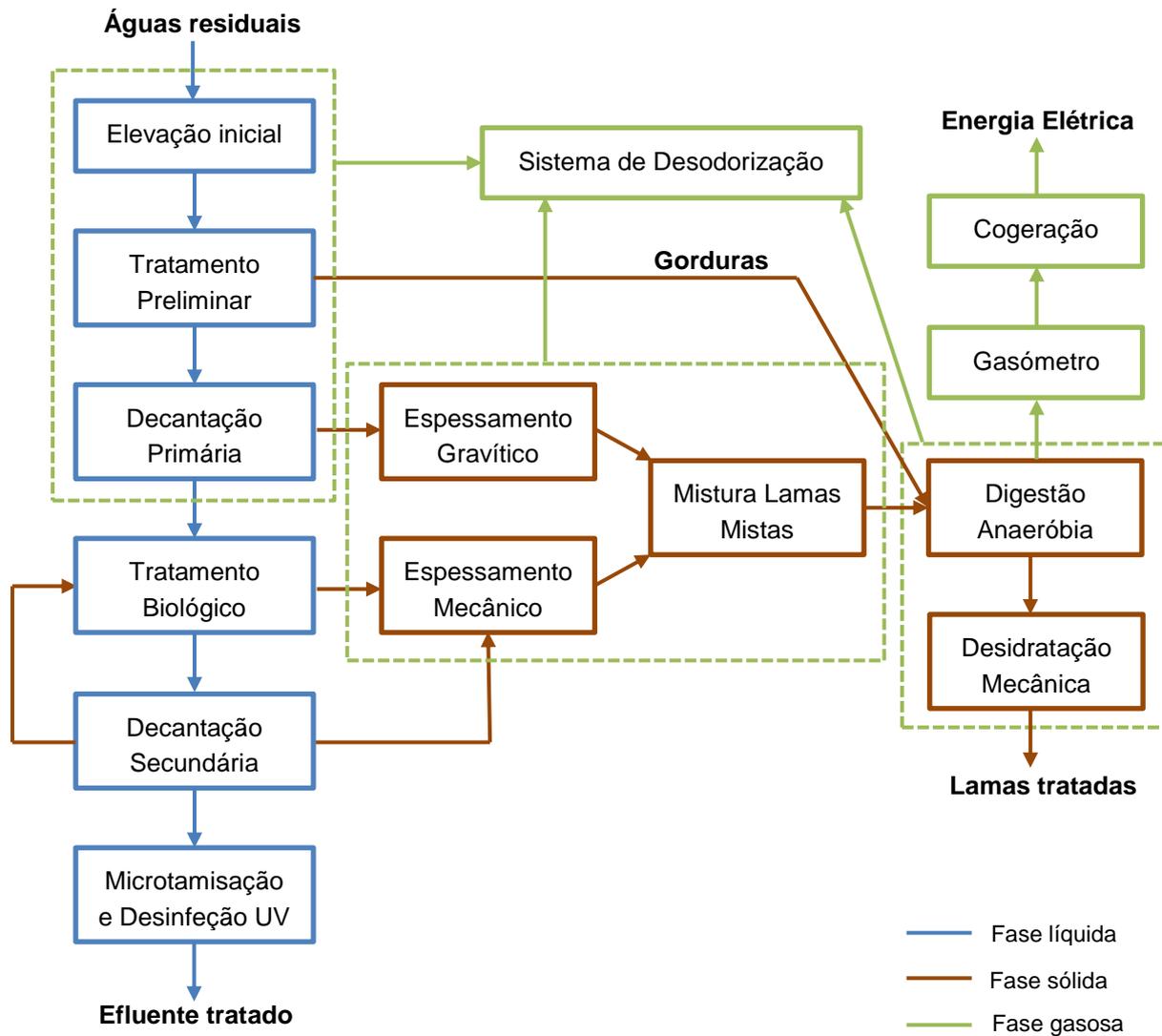


Figura 10: Esquema geral de funcionamento da ETAR do Ave.

De seguida, segue a descrição geral de cada uma das etapas de tratamento apresentadas.[18]

3.1.1.1 Elevação inicial

As águas residuais afluentes são inicialmente sujeitas a uma elevação através de dois estágios de parafusos de Arquimedes (Figura 11). Cada estágio de elevação apresenta 2 parafusos de Arquimedes mais um de reserva.



Figura 11: Elevação inicial em 2 estágios

Esta estação de bombagem foi projetada de modo a garantir uma altura de elevação tal que permite o escoamento gravítico ao longo de todos os órgãos de tratamento que compõem a fase líquida da ETAR evitando-se, assim, a necessidade de bombeamento adicional.

O consumo energético associado a esta etapa é monitorizado diariamente através de um sistema de supervisão.

3.1.1.2 Tratamento preliminar

As operações de gradagem e desarenamento/desengorduramento das águas residuais são realizadas no interior do edifício de tratamento preliminar para minimizar ao máximo a emissão de odores.

A gradagem é efetuada em duas fases, inicialmente realiza-se uma gradagem grosseira mecanizada de 40 mm de espaçamento entre barras que permite proteger o equipamento de gradagem fina. Este equipamento, por sua vez, corresponde a um tamisador filtrante rotativo com malha de 3 mm.

A etapa de desarenamento/desengorduramento, que se pode visualizar na Figura 12, ocorre no mesmo órgão equipado com arejadores submersíveis para promover a lavagem de areias e a flutuação de óleos e gorduras. As areias depositam-se no fundo do tanque enquanto que os óleos e gorduras são removidos por um raspador de superfície. Esta operação protege os equipamentos mecânicos de desgaste, evita a acumulação de areias nos órgãos a jusante e evita eventuais problemas operacionais na etapa de tratamento biológico.



Figura 12: Etapa de desarenamento e desengorduramento

As gorduras são depois conduzidas para os digestores anaeróbios de lamas, mais concretamente para a linha de recirculação de lamas aquecidas. Assim, para além de se evitar a evacuação de um resíduo de difícil manuseamento, valoriza-se energeticamente esse mesmo resíduo através da digestão. Antes da entrada nos digestores procede-se à mistura das gorduras com as lamas em aquecimento de forma a minimizar o risco de migrarem diretamente para a superfície líquida sem serem degradadas.

3.1.1.3 Decantação primária

Após o tratamento preliminar as águas residuais são encaminhadas para os decantadores primários.

A etapa de decantação primária é realizada em decantadores lamelares de planta quadrada. Este tipo de configuração permite aumentar a área de decantação e, conseqüentemente, reduzir o espaço necessário de implantação, assim como diminuir consideravelmente a carga orgânica afluyente ao tratamento biológico.

Através da força da gravidade, os sólidos sedimentáveis ficam concentrados no fundo e são, posteriormente, removidos através de uma ponte raspadora de fundo.

De forma a minimizar a emissão de odores, os decantadores têm uma cobertura de tela amovível.

3.1.1.4 Tratamento biológico

O tratamento biológico é efetuado em reatores biológicos de lamas ativadas do tipo vala de oxidação circulares (Figura 13).

Cada uma das linhas de tratamento biológico será composta por três zonas distintas: um tanque de contacto (seletor), um tanque anóxico e um tanque de arejamento.



Figura 13: Reator biológico.

O tanque de contacto não apresenta sistema de arejamento, funcionando em condições anóxicas e no qual se realiza uma seleção da biomassa com uma boa decantabilidade, controlando-se a proliferação das bactérias filamentosas.

No tanque anóxico as águas residuais afluentes são misturadas com a recirculação do licor misto rico em nitratos, proveniente da zona arejada do reator biológico. Neste tanque as condições cinéticas são favoráveis para o desenvolvimento do processo de desnitrificação, isto é, a conversão biológica dos nitratos em azoto atmosférico, essencial ao controlo da concentração de azoto no efluente.

No tanque de arejamento as águas residuais são submetidas alternadamente a condições aeróbias e anóxicas. Neste tanque remove-se a maior fração de matéria carbonada, converte-se a amónia em nitratos, através do processo de nitrificação, e, simultaneamente, ocorre a desnitrificação de uma fração de nitratos produzidos nas zonas arejadas. Uma parte do fósforo contido nas águas residuais é igualmente eliminado, juntamente com as lamas biológicas em excesso. O oxigénio necessário ao processo aeróbio é fornecido através de um sistema de difusores de bolha fina que em conjunto com agitadores tipo “*Banana Blade*” promovem a agitação necessária para o contacto entre os microrganismos e os compostos a degradar.

O facto do seletor e do tanque anóxico se encontrarem dentro do reator biológico, permite obter um rearranjo espacial mais funcional comparativamente com a implantação separada destes órgãos.

3.1.1.5 Decantação secundária

O efluente proveniente dos reatores biológicos é clarificado através da decantação secundária, realizada em decantadores circulares. A fase líquida segue para o tratamento secundário enquanto que uma parte das lamas decantadas é recirculada para o reator biológico e a restante parte é removida e encaminhada para o tratamento de lamas.

Os decantadores são constituídos por uma ponte raspadora de fundo para remover as lamas depositadas e uma ponte raspadora de superfície, visível na Figura 14, para remover escumas que eventualmente se formam.



Figura 14: Decantador secundário.

3.1.1.6 Filtração e desinfecção

O efluente proveniente do decantador secundário é inicialmente filtrado por meio de microtamisação com malha de 30 μm , para reduzir a concentração de sólidos em suspensão e garantir uma boa eficiência do sistema de desinfecção a jusante.

A desinfecção final é realizada por meio de radiação ultravioleta, com lâmpadas de nova geração, tipo baixa pressão e alto rendimento, e com um sistema de limpeza automático mecânico e químico. Este sistema de lâmpadas UV garante um grau de desinfecção correspondente a uma qualidade de descarga, com valores de coliformes fecais da ordem dos 2 000 NMP/100mL.

3.1.1.7 Reutilização do efluente tratado

Após o tratamento terciário, uma fração de efluente tratado é reutilizado como água de serviço, por exemplo, para lavagem dos espessadores mecânicos e centrífugas, diluição das soluções de polímero, rega dos espaços verdes, lavagem de pavimentos, entre outros. Dado que a qualidade mínima exigida para a água de rega no que respeita aos coliformes fecais é de 100 NMP/100mL o grau de desinfecção atingido à saída do sistema de microtamisação/desinfecção não é compatível com o valor exigido, pelo que é necessária uma afinação final do efluente a reutilizar como água de serviço na ETAR. Para tal, parte do efluente tratado é elevado para um tanque de armazenamento, sendo que quando for necessária água de serviço, o efluente é aspirado e desinfetado num sistema compacto de desinfecção por UV, garantindo-se assim o grau de desinfecção requerido para a reutilização do efluente para os usos referidos.

3.1.1.8 Espessamento das lamas primárias e das lamas biológicas

As lamas primárias retiradas dos decantadores lamelares são elevadas para dois espessadores gravíticos com o intuito de reduzir o seu conteúdo em água.

Por outro lado, as lamas biológicas em excesso, extraídas dos decantadores secundários, são espessadas mecanicamente em tambores de espessamento.

No final destas duas etapas, estes dois tipos de lamas espessadas são misturados num tanque de mistura.

3.1.1.9 Digestão anaeróbia

Após a mistura das lamas espessadas, as lamas mistas são estabilizadas pelo processo de digestão anaeróbia. Este processo realiza-se no interior dos digestores, Figura 15, em regime mesófilo a 35°C, na ausência de oxigénio, e tem como produtos finais biogás e biosólidos estabilizados.



Figura 15: Digestores anaeróbios.

Para manter a temperatura de digestão a 35°C a ETAR tem instalado um sistema para aquecimento das lamas. Este sistema é constituído por 2 permutadores de calor, nos quais se realiza o aquecimento através do cruzamento de água quente e de lamas em recirculação. O aquecimento da água, por sua vez, é levado a cabo através do aproveitamento da energia térmica proveniente do cogenerator ou, alternativamente, de uma caldeira de água quente com queimador misto biogás/gás propano.

No interior dos digestores é fundamental assegurar uma boa mistura das lamas para que o processo de digestão decorra normalmente. O sistema de agitação, para cada digestor, consiste na agitação mecânica por intermédio de um agitador de eixo vertical do tipo SCABA, com 2 hélices. A conceção deste tipo de agitador combinada com uma construção robusta e

modular garante um correto funcionamento do processo de digestão, com uma maior eficiência e um baixo consumo de energia.

3.1.1.10 Aproveitamento do biogás

O biogás produzido na digestão anaeróbia é armazenado num gasómetro, sendo depois utilizado para produção de energia e aquecimento das lamas. Antes do aproveitamento energético do biogás existe um sistema de secagem e filtração que tem como função reduzir o teor de H₂S e a quantidade de água presente no biogás.

Para o aproveitamento energético do biogás estão instalados na ETAR dois grupos de cogeração que permitem a produção de energia elétrica e térmica (Figura 16). O sistema de recuperação de energia permite satisfazer as necessidades térmicas de aquecimento do processo de digestão e suprimir parcialmente as necessidades energéticas da ETAR.



Figura 16: Grupo de cogeração.

Caso a qualidade do biogás não seja a mais adequada para valorização este é queimado numa tocha.

3.1.1.11 Desidratação das lamas digeridas

Após o processo de digestão as lamas são sujeitas a uma etapa de desidratação que se realiza em centrífugas. Com o intuito de melhorar a eficiência da desidratação adiciona-se e mistura-se as lamas com um polieletrólito antes da operação de desidratação.

Por fim, as lamas são armazenadas em silos e, mais tarde, descarregadas diretamente em camiões para serem encaminhadas para o seu destino final, como por exemplo a valorização agrícola.

3.1.1.12 Desodorização

O ar a ser tratado, produzido nas etapas de elevação inicial, tratamento preliminar, decantação primária e tratamento de lamas, é extraído destas diversas fontes de emissão e insuflado no sistema de desodorização através de um ventilador centrífugo, com variação de velocidade.

O sistema de desodorização instalado na ETAR do Ave consiste num sistema de lavagem química com 3 estágios, como se pode visualizar na Figura 17. Nesta tecnologia, aplica-se ácido, no primeiro estágio, com o intuito de remover compostos amoniacais e, no segundo e terceiro estágios, aplica-se oxidante em meio alcalino para remover sulfureto de hidrogénio, sulfuretos orgânicos, mercaptanos e ácidos carboxílicos, e outros compostos orgânicos odoríferos e oxidáveis.



Figura 17: Sistema de desodorização.

3.1.2 DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS DE DIMINUIÇÃO DOS CONSUMOS DE ENERGIA

Com vista à redução do consumo de energia externa na ETAR do Ave, a Efacec propôs os seguintes investimentos:[55]

- Produção de energia renovável através de uma central fotovoltaica de autoconsumo com potência de ligação de 300 kW. Desta forma, prevê-se uma produção anual de 521 MWh sendo que após dedução de perdas e limitação de potência a energia autoconsumida anualmente seria de 490 MWh. A Figura 18 representa a área de implantação dos painéis solares na ETAR.
- Substituição de um dos sobressores GM150 S existentes pelo modelo Delta *Hybrid* para aumentar a eficiência energética na fase de arejamento. No caso do GM150 S a potência absorvida à rede, aos 50Hz, é de 240kW, enquanto que o sobressor *Hybrid*, para a mesma frequência, apresenta uma potência de 206kW, existindo assim uma poupança de 34kW por

cada hora de arejamento. Este novo equipamento denomina-se de híbrido uma vez que resulta da sinergia entre as tecnologias de um sobrepessor de êmbolos rotativos e de um compressor de parafuso.[56]

- Substituição da instrumentação de medição online de amónia e nitratos, no reator biológico, por sondas com correção de interferentes integrada, com o intuito de ajustar, o mais rigorosamente possível, o caudal de ar fornecido pelo soprador às exigências do processo, evitando desta forma desperdícios de energia. A ETAR do Ave encontra-se próxima do litoral apresentando, portanto, problemas de intrusão salina. Dado que as sondas existentes são de modelos antigos, as medições efetuadas sofrem influências devido à presença de interferentes, como é o caso dos cloretos, tornando inviável a utilização destas sondas para controlar os ciclos de nitrificação e desnitrificação. Assim sendo, a Efacec propôs o fornecimento e instalação de instrumentação que permite um controlo efetivo das concentrações de azoto amoniacal e nitratos.



Figura 18: Ilustração em 3D da área de implantação dos painéis solares na ETAR do Ave.[55]

A Efacec estudou também a hipótese de substituir o sistema de difusores por outro mais eficiente, contudo, de acordo com a análise custo/benefício efetuada, essa opção não trazia vantagens para a exploração da ETAR.

3.1.2.1 Impacto alcançado com as medidas propostas

Tendo em consideração a implementação das medidas propostas, a Efacec prevê uma redução de 31,2% da energia consumida na ETAR (Tabela 4). De realçar que estes resultados são meramente teóricos dado que foram obtidos através dos dados disponíveis nos catálogos dos novos equipamentos.

Tabela 5: Impacto alcançado no consumo energético após a implementação das medidas propostas. Adaptado de [55]

	Consumo energia (kWh/ano)	Caudal anual (m ³ /ano)	Consumo energia (kWh/m ³)
Energia consumida na ETAR em 2015	2.379.360	4.074.948	0,58390
Energia consumida na ETAR após implementação das medidas	2.653.089	5.024.000	0,52808
Central fotovoltaica	- 490.000		- 0,09753
Utilização soprador híbrido	- 144.890		- 0,02883
Total	2.018.249	-	0,40172
Redução conseguida	31,20%		

3.1.3 METODOLOGIA

Para se avaliar os consumos energéticos na ETAR do Ave antes e depois da implementação das medidas de minimização de consumo de energia, anteriormente expostas, e, posteriormente, se propor soluções para a melhoria da eficiência energética da planta em estudo seguiu-se a seguinte metodologia:

- 1) Recolha e análise dos dados de consumo diário por quadro elétrico no último ano (26 março 2017 a 26 março 2018);
- 2) Identificação das fases de tratamento mais intensivas em energia;
- 3) Análise das potências dos equipamentos existentes em cada etapa de tratamento com vista à identificação daqueles cujos consumos deverão ser medidos e analisados individualmente;
- 4) Medição dos consumos energéticos e outras variáveis elétricas nos equipamentos selecionados previamente recorrendo a um analisador de rede;
- 5) Comparação dos dados teóricos (informação disponibilizada pela Efacec) com os resultados obtidos nas medições de campo;
- 6) Descrição de ineficiências encontradas e possíveis formas de melhoria;
- 7) Pesquisa e proposta de soluções para otimizar a eficiência energética da instalação.

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 CONSUMO ELÉTRICO POR ETAPA DE TRATAMENTO

Na tabela seguinte encontram-se identificados os quadros elétricos existentes na ETAR do Ave e os respetivos analisadores utilizados para cada etapa de tratamento. Os dados de consumo elétrico diário obtidos para cada um dos analisadores correspondem ao período de 26 de março de 2017 a 26 de março de 2018. Tendo estes dados, foi possível calcular o consumo energético anual permitindo saber quais as etapas de tratamento mais intensivas em energia.

Tabela 6: Quadros elétricos existentes na ETAR do Ave e respetivo consumo energético

Quadro elétrico	Descrição	Analisador	Energia total (kWh/ano)
Q1	Edifício de Exploração	A. 1 (geral)	33400
Q2	Obra de Entrada	A. 2 (geral)	669650
		A. 2.1. (lamas primárias)	25054
Q3	Desodorização	A. 3 (geral)	81466
Q4	Arejamento	A. 4 (geral)	1328744
Q5	Decantadores Secundários	A. 5 (geral)	187154
		A. 5.1 (extração de lamas)	12353
Q6	Lamas e Cogeração	A. 6 (geral)	328552
		A. 6.1 (digestão de lamas)	93361
		A. 6.2 (recuperação de energia)	46745
		A. 6.3 (lamas primárias)	8539
Q7	Terciário	A. 7 (geral)	115918
QGBT	Consumo de energia	A. QGBT (Chegada gerador de emergência)	0
		A. QGBT (Chegada TP1)	2769040
QGPE	Produção de energia	A. QGPE (Chegada cogeração)	1316025

Cada um dos quadros elétricos (Q1 a Q7) corresponde a uma etapa de tratamento em específico, sendo que os equipamentos que cada um deles engloba podem ser encontrados no Anexo I assim como a sua respetiva potência. O quadro QGPE diz respeito à energia produzida através da cogeração que é posteriormente vendida à rede elétrica nacional enquanto que o quadro QGBT corresponde ao consumo de energia de toda a ETAR (média de 230.753 kWh/mês)

Os analisadores 2.1 e 6.3 referem-se às lamas primárias, contudo em etapas de tratamento distintas. O analisador 2.1 abrange os equipamentos referentes à decantação primária enquanto que o analisador 6.3 engloba os equipamentos necessários para o espessamento destas lamas em questão.

Para facilitar a análise dos resultados obtidos referentes ao consumo elétrico total para cada fase de tratamento apresenta-se de seguida os dados na forma gráfica.

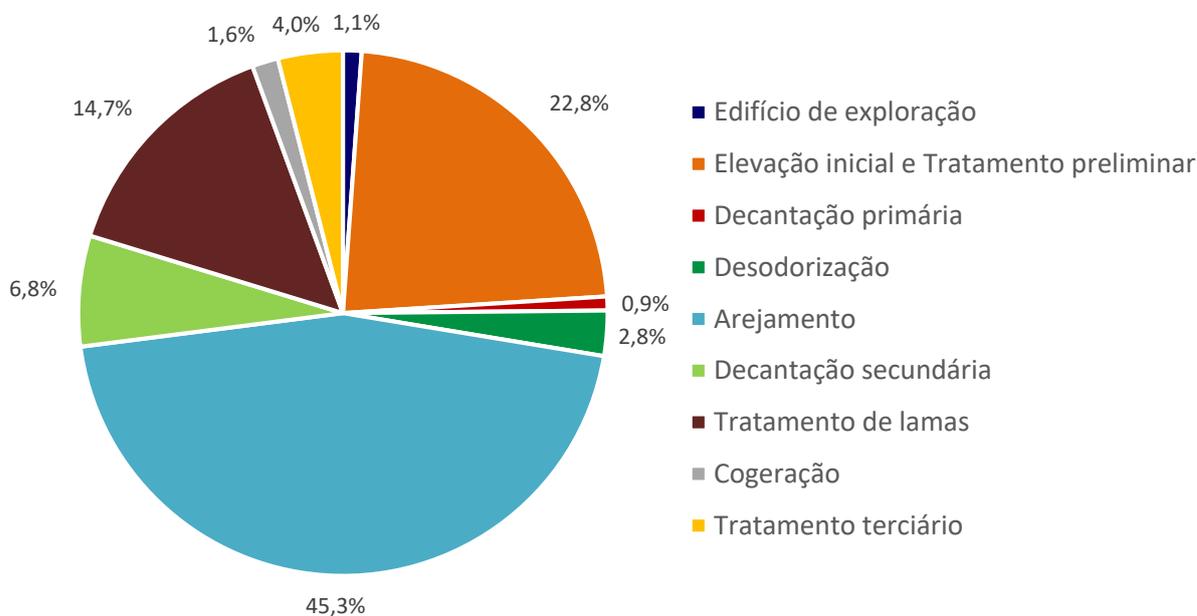


Figura 19: Distribuição dos consumos elétricos na ETAR do Ave.

Como referido na literatura, o arejamento corresponde ao processo que requer mais energia representando, no caso da ETAR do Ave, cerca de 45% do consumo energético total. Tal resultado deve-se essencialmente ao funcionamento do sobreprensor de êmbolos rotativos que apresenta uma potência instantânea bastante considerável (250 kW).

A segunda etapa mais intensiva em energia trata-se da elevação inicial e tratamento preliminar, fundamentalmente devido à operação dos parafusos de Arquimedes (1 para cada estágio de elevação). O tratamento preliminar requer também a utilização de vários tipos de equipamentos mecânicos, tais como arejadores submersíveis, compressores ou bombas (Tabela I-1), que em conjunto representam um consumo energético significativo.

O tratamento de lamas, que representa 14,7% do consumo elétrico da ETAR do Ave, engloba várias etapas, nomeadamente o espessamento, a digestão e a desidratação, utilizando, portanto, um diverso número de equipamentos. A centrífuga utilizada na desidratação das lamas digeridas trata-se de um equipamento que requer um elevado consumo elétrico. Além deste, o agitador de eixo vertical tipo SCABA presente no digestor anaeróbio, dado que se encontra em funcionamento 24 horas por dia durante todo o ano, apresenta também um consumo de energia importante. Segundo a literatura, a etapa de digestão anaeróbia apresenta um consumo energético médio de 0,03 kWh/m³ para ETARs com uma PE de 50 k a 100 k.[8] No entanto, a ETAR do Ave regista um consumo de energia mais baixo, 0,02 kWh/m³, provavelmente devido à digestão simultânea das lamas com as gorduras extraídas na ETAR (codigestão) que permite um melhor desempenho em comparação com a etapa de digestão anaeróbia convencional.

Na decantação secundária a bomba centrífuga submersível para recirculação das lamas é aquela que exige um maior consumo de energia visto que, apesar da altura de elevação não ser, neste caso, relevante, o caudal de lamas a bombear para o reator biológico é considerável (taxa de recirculação superior a 100%). Neste caso, o consumo energético resultante da etapa de decantação juntamente com a recirculação de lamas é cerca de 0,02 kWh/m³ enquanto que na ETAR do Ave este parâmetro sobe para 0,04 kWh/m³. [8]

Relativamente ao tratamento terciário este apresenta uma maior importância durante os meses de verão devido à utilização das lâmpadas UV para desinfeção do efluente antes da sua descarga para o rio Ave. Nos restantes meses do ano apenas se utiliza o microtamizador e também uma bomba centrífuga submersível para elevar o efluente tratado para, depois da etapa de afinação, ser reutilizado. Deste modo, a energia consumida nesta etapa de tratamento é cerca de 0,025 kWh/m³ enquanto que, de acordo com a bibliografia, este consumo pode ser bastante superior, 0,075 kWh/m³.

Em suma, será dado um maior destaque aos equipamentos presentes nas fases de tratamento mais intensivas em energia, isto é, no arejamento, na elevação inicial e tratamento preliminar e no tratamento de lamas.

4.2 POTÊNCIAS DOS EQUIPAMENTOS

Tendo como base os dados disponibilizados pela Efacec referentes às potências de todos os equipamentos existentes na ETAR (Anexo I) foi possível constatar quais aqueles que apresentavam uma maior potência instantânea bem como o seu consumo energético diário tendo em consideração o seu período de operação e a época do ano. Na Tabela II-1, presente no Anexo II, encontram-se então os 6 principais equipamentos no que concerne ao consumo teórico anual de energia elétrica:

1. Sobreprensor de êmbolos rotativos
2. Ventilador

3. Parafuso de Arquimedes
4. Centrífuga
5. Bomba centrífuga submersível
6. Módulos de lâmpadas UV com limpeza automática

As lâmpadas UV, como já mencionado anteriormente, apenas são utilizadas entre 1 de junho e 30 de setembro não apresentando qualquer consumo de energia durante os outros meses. No entanto, apesar do seu curto período de utilização apresentam um gasto energético superior ao da centrífuga para a época estival.

Nos restantes equipamentos verifica-se que o seu período de funcionamento é mais alargado durante a época estival de modo a satisfazer as necessidades de tratamento mais exigentes. Devido ao aumento do caudal afluyente bem como da carga orgânica o tempo de operação dos equipamentos é estendido o que origina um maior consumo energético comparativamente com a época normal.

O equipamento que se destaca pela sua elevada potência e, conseqüente, consumo de energia é o sobressor de êmbolos rotativos sendo, portanto, o principal responsável pelo grande consumo energético na fase de arejamento e em toda a ETAR, como se pode visualizar no gráfico da Figura 20. Deste modo, a Efacec adquiriu um sobressor mais eficiente (referido na secção 3.1.2) com vista à redução do consumo de energia no processo de produção de ar no reator biológico.

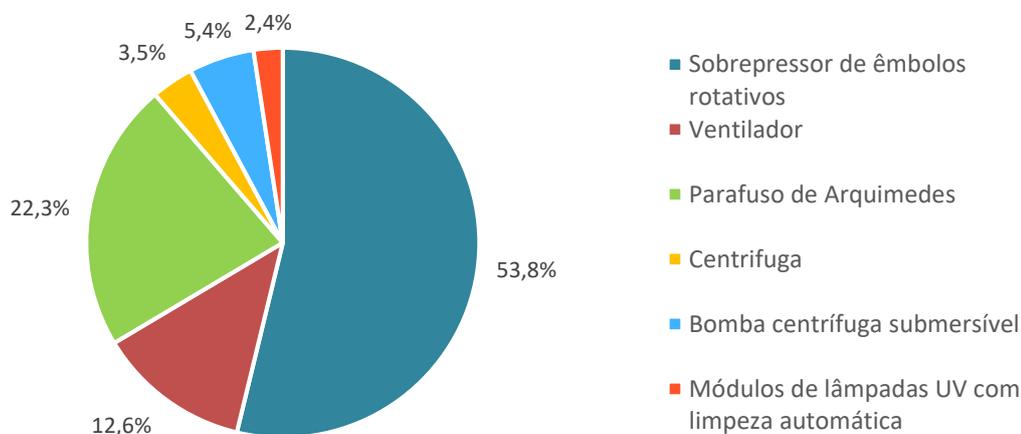


Figura 20: Representação gráfica do consumo energético anual dos 6 principais equipamentos da ETAR.

Como os módulos de lâmpadas UV só entram em funcionamento na época alta não será possível medir os consumos energéticos associados à etapa de desinfecção UV, durante o período de realização desta dissertação, logo apenas se irá estudar os consumos energéticos reais dos restantes 5 equipamentos aqui destacados.

4.3 DADOS RECOLHIDOS PELO ANALISADOR DE REDE

Para a análise do funcionamento dos 5 equipamentos selecionados presentes na ETAR utilizou-se um analisador de rede (Figura 21) que permite monitorizar e registar uma série de grandezas elétricas ao longo de um tempo determinado (frequência, potência, energia, distorção harmónica total, fator potência, potência reativa, etc.). Do conjunto de variáveis que o analisador de rede é capaz de medir interessa, fundamentalmente, analisar a potência e a energia consumida do equipamento em estudo.



Figura 21: Analisador de rede

Importa referir que na ETAR do Ave, tal como indicado nas tabelas do Anexo I, existem vários equipamentos do mesmo modelo, para cada linha de tratamento, que vão funcionando de forma alternada. Posto isto, dos 5 equipamentos escolhidos apenas se efetuaram medições num equipamento de cada tipo considerando-se que os restantes do mesmo modelo seguem um comportamento idêntico ao analisado.

4.3.1 SOBREPRESSOR DE ÊMBOLOS ROTATIVOS

Durante o período de 23 a 27 de abril, o analisador de rede recolheu os dados relativos ao funcionamento do sobreprensor de êmbolos rotativos (Figura 22). Para a análise dos resultados obtidos começou-se por excluir aqueles referentes aos dias 23 e 27 uma vez que não continham dados para as 24h do dia não sendo, portanto, representativos.



Figura 22: Sobreprensor de êmbolos rotativos.

A tabela que se segue apresenta a energia total consumida e a potência do sobressor bem como o tempo de operação nos dias 24, 25 e 26 de abril.

Tabela 7: Energia consumida e potência do sobressor nos dias 24,25 e 26 de abril

	24 abril	25 abril	26 abril
Tempo de funcionamento (h)	11,3	8,8	8,8
Energia total (kWh)	2179	1823	1821
Potência (kW)	192,8	207,2	206,9

Como se pode constatar, no dia 24 de abril registou-se um maior consumo energético dado que o equipamento esteve em atividade durante um maior número de horas. Por norma, o sobressor funciona em ciclos *on-off* sendo que, entre as 12h e a meia noite, encontra-se em funcionamento durante 12 minutos e desligando por 18 minutos e, posteriormente, até as 12h do dia seguinte o compressor reduz o seu funcionamento para 10 minutos e suspende a sua atividade por 20 minutos. No entanto, como demonstrado no gráfico da Figura 23, no dia 24 de abril verificou-se um funcionamento contínuo entre as 11h12 e as 15h25 o que conduziu a um maior tempo de funcionamento e, conseqüentemente, a um consumo de energia superior aos restantes dias em estudo. A energia elétrica necessária para estas 4 horas de arejamento contínuo foi assegurada pelos painéis fotovoltaicos, que ainda não tinham licença para injetar a energia produzida na rede elétrica nacional. Deste modo, a energia produzida pelos painéis era obrigatoriamente utilizada para usos internos.



Figura 23: Gráfico representativo da variação do consumo de energia ao longo do dia 24 de abril.

A observação do gráfico permite ainda visualizar os diversos picos de energia ao longo do dia, que resultam da entrada em funcionamento do sobressor, seguidos de valores nulos, que correspondem aos períodos de inatividade deste equipamento, explicados anteriormente.

Segundo o catálogo do fornecedor, a potência nominal do sobreprensor é de 240 kW e a potência média verificada nestes três dias foi de 202 kW, verificando-se assim uma diferença de cerca de 16%. Por conseguinte, os consumos energéticos registados foram inferiores aos valores teóricos presentes na Tabela II-1.

Tendo em conta os resultados destes 3 dias de medições, este equipamento é responsável por 37% do consumo energético global da instalação. Pode-se ainda destacar que este sobreprensor registou um consumo de energia de 0,15 kWh/m³ apresentando um melhor desempenho em comparação com os dados presentes na bibliografia, 0,22 kWh/m³. [8] No entanto, devido à necessidade de operar durante um maior número de horas durante a época alta, este resultado poderá ser superior apresentando-se mais próximo do indicado na literatura.

Por último, importa referir que um dos objetivos propostos inicialmente seria analisar o funcionamento do recente sobreprensor instalado na ETAR do Ave, o sobreprensor híbrido, para se comparar, do ponto de vista de eficiência energética, com o modelo mais antigo. Contudo, devido à demora da sua instalação, não foi possível recolher atempadamente os dados deste novo equipamento o que impediu de efetuar este estudo comparativo.

4.3.2 BOMBA CENTRÍFUGA DE RECIRCULAÇÃO DE LAMAS

Após a recolha dos dados do sobreprensor instalou-se o analisador de rede no quadro elétrico da bomba centrífuga de recirculação de lamas. Acoplado à bomba de recirculação encontra-se um variador de frequência que controla a velocidade de rotação do motor da bomba de modo a satisfazer os requisitos de operação da planta ao mesmo tempo que economiza energia. Desta forma, o comportamento da bomba é modelado pelo variador de frequência permitindo assim operar de uma forma mais eficiente. O analisador de rede foi instalado a montante do variador e da bomba, logo os dados recolhidos, presentes na Tabela 7, correspondem ao funcionamento otimizado destes dois equipamentos em conjunto.

Tabela 8: Energia consumida e potência média da bomba centrífuga de recirculação de lamas nos dias 1, 2 e 3 de maio

	1 maio	2 maio	3 maio
Tempo de funcionamento (h)	24	24	19,5
Energia total (kWh)	558	525	409
Potência (kW)	23,2	21,9	20,9

Na ETAR do Ave, em cada linha de tratamento, existem duas bombas de recirculação de lamas sendo que o seu funcionamento é alternado, ou seja, enquanto uma bomba encontra-se em operação a outra está parada e, após um determinado período, ocorre uma troca entre elas. No dia 3 de maio, a partir das 19h30, o analisador deixou de registar dados indicando

que o funcionamento da bomba em estudo foi interrompido passando a recirculação das lammas a ser feita pela outra bomba existente na linha de tratamento.

Relativamente ao consumo energético registado este foi bastante superior ao esperado, isto é, em comparação com os valores teóricos presentes na Tabela II-1. Tal aconteceu porque na prática verificou-se um tempo de operação mais alargado assim como uma maior potência absorvida pelo equipamento. Contudo, quanto à potência, verifica-se ainda uma diferença de 37% em relação à potência nominal do modelo desta bomba (35 kW), diferença esta que pode ser justificada pelo facto da bomba de recirculação não estar a operar à sua frequência máxima para a qual foi projetada.

4.3.3 PARAFUSOS DE ARQUIMEDES

A fase de elevação inicial do afluente que chega à ETAR requer uma quantidade de energia significativa, deste modo torna-se importante analisar o funcionamento dos parafusos de arquimedes presentes em cada estágio de elevação.

Inicialmente, as águas residuais afluentes são elevadas pelos parafusos do 1º estágio de elevação até à câmara de aspiração do 2º estágio para onde afluem também as escorrências provenientes dos diversos tratamentos a jusante da ETAR. Seguidamente, os parafusos do 2º estágio elevam para o edifício do tratamento preliminar as águas residuais juntamente com as escorrências. Assim, apesar destes equipamentos serem exatamente do mesmo modelo independentemente do estágio de elevação, é expectável que os dados recolhidos pelo analisador de rede sejam distintos devido à diferença de caudal a elevar em cada estágio.

Importa ainda referir que ambos os parafusos estão equipados com variador de frequência com o intuito de garantir, o quanto possível, uma alimentação continua ao tratamento a jusante.

4.3.3.1 1º estágio de elevação

Começou-se por recolher os dados de operação de um parafuso de arquimedes do 1º estágio de elevação, indicados na Tabela 8.

Tabela 9: Energia consumida e potência média do parafuso de arquimedes do 1º estágio nos dias 5, 6 e 7 de maio

	5 maio	6 maio	7 maio
Tempo de funcionamento (h)	12,6	11,3	12,2
Energia total (kWh)	261	194	239
Potência (kW)	20,8	17,2	19,5

Pela análise da Tabela 8, verifica-se que o parafuso de arquimedes do 1º estágio de elevação operou durante cerca de 12h/dia sendo o seu consumo médio de energia 231 kWh.

A potência absorvida, registada ao longo destes três dias, foi cerca de $\frac{1}{4}$ do valor da potência nominal do parafuso de arquimedes (75 kW).

4.3.3.2 2º estágio de elevação

Após a recolha dos dados referentes ao parafuso do 1º estágio de elevação procedeu-se ao estudo de um dos parafusos presentes no 2º estágio. As medições foram efetuadas entre os dias 9 e 13 de maio e os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 10: Energia consumida e potência média do parafuso de arquimedes do 2º estágio entre os dias 9 e 13 de maio

	9 maio	10 maio	11 maio	12 maio	13 maio
Tempo de funcionamento (h)	8,9	8,9	8,0	8,0	8,9
Energia total (kWh)	196	196	185	184	207
Potência (kW)	22,1	22,1	23,0	23,0	23,4

No 2º estágio de elevação verificou-se que o parafuso de arquimedes trabalha durante cerca de 8,5h/d o que conduziu a um consumo energético médio de 194 kWh. Em relação à potência registada, os resultados foram ligeiramente superiores aos obtidos no parafuso do 1º estágio de elevação.

Partindo agora para uma análise comparativa entre os dois parafusos estudados foi possível constatar que o parafuso de arquimedes do 2º estágio operou menos 3,5h/dia e registou, portanto, um menor consumo energético do que o parafuso presente no 1º estágio de elevação. Tendo em conta que este equipamento que se encontra no 2º estágio tem de elevar um maior caudal seria de esperar que os valores registados quanto ao tempo e à energia consumida fossem superiores. No entanto, tal não se verificou visto que a frequência do motor deste equipamento é 34-36 Hz enquanto que no 1º estágio a frequência é ligeiramente inferior, 32-34 Hz. Assim, como o motor funciona a uma maior velocidade de rotação não necessita de operar durante tantas horas, justificando as diferenças registadas nos dois estágios de elevação. Relativamente à potência absorvida pelos dois parafusos verificou-se nos dois casos uma grande diferença em relação à sua potência nominal (75 kW) visto que estes equipamentos estão a operar com uma frequência mais baixa do que a frequência nominal (50 Hz). Por esta razão, o parafuso do 1º estágio de elevação registou uma potência mais reduzida uma vez que a frequência do motor era também mais baixa.

Por fim, a etapa de elevação inicial na ETAR do Ave requer um consumo de 0,034 kWh de energia elétrica por m³ de efluente tratado, sendo que na literatura este parâmetro ronda os 0,042 kWh/m³. [8] No entanto, como já mencionado, este valor pode ser mais elevado durante a época estival visto que há um maior consumo de energia, derivado do prolongamento da operação dos parafusos de arquimedes.

4.3.4 CENTRÍFUGA

A centrífuga, representada na Figura 24, está equipada com 2 variadores de frequência, sendo que um é para o motor e outro para o parafuso. Estes dois variadores permitem otimizar a velocidade da centrífuga de modo a obter lamas mais secas sem que as escorrências fiquem demasiado sujas e prejudiquem o tratamento quando são encaminhadas para a entrada da ETAR.



Figura 24: Centrífuga.

O analisador de rede registou, entre os dias 16 e 21 de maio, os dados referentes ao funcionamento da centrífuga, sendo que se excluiu o dia 21 de maio uma vez que nesse dia a atividade da centrífuga foi interrompida. Na Tabela 10 estão expostos os principais resultados obtidos.

Tabela 11: Energia consumida e potência média da centrífuga entre os dias 16 e 20 de maio

	16 maio	17 maio	18 maio	19 maio	20 maio
Tempo de funcionamento (h)	9,2	8,6	7,9	12,7	12
Energia total (kWh)	142	128	115	187	171
Potência (kW)	15,4	14,9	14,6	14,7	14,8

Entre os dias 16 e 20 de maio a centrífuga operou, em média, 10h/dia perfazendo um consumo energético de 149 kWh. Quanto à potência média absorvida pela centrífuga nestes 5 dias esta encontra-se bastante abaixo da sua potência nominal (45 kW) apresentando, mais concretamente, uma diferença de 67%.

A figura seguinte apresenta a variação da energia consumida para a operação da centrífuga ao longo dos dias em estudo.



Figura 25: Gráfico representativo da variação do consumo de energia entre os dias 16 e 20 de maio.

Através do gráfico é possível visualizar que a centrífuga opera fundamentalmente durante o período diurno sendo a energia elétrica necessária ao seu funcionamento fornecida, sempre que possível, pelos painéis fotovoltaicos instalados recentemente na ETAR.

4.3.5 VENTILADOR



Figura 26: Ventilador

Por último, instalou-se o analisador de rede no quadro elétrico do ventilador utilizado na etapa de desodorização (Figura 26).

As medições foram realizadas entre os dias 25 e 29 de maio sendo que somente se consideraram representativos os dias 26, 27 e 28 de maio. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 11.

Tabela 12: Energia consumida e potência média do ventilador entre os dias 26 e 28 de maio

	26 maio	27 maio	28 maio
Tempo de funcionamento (h)	14,1	15,9	13,9
Energia total (kWh)	81	143	80
Potência (kW)	5,7	9,0	5,8

O ventilador em estudo trabalha em contínuo durante cerca de 14-15h por dia com o intuito de ventilar todas as zonas responsáveis pela emissão de odores como é o caso das etapas de elevação inicial, tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento de lamas.

Atualmente, como já referido anteriormente, a ETAR do Ave encontra-se sobredimensionada estando apenas 1 das 3 linhas de tratamento a funcionar. Deste modo, com um menor caudal de águas residuais a chegar à ETAR há uma menor emissão de odores durante as diversas etapas de tratamento. Assim, para gerar poupanças energéticas optou-se por diminuir o número de renovações de ar nos edifícios a desodorizar, desligar a ventilação durante a noite e reduzir a frequência do motor do ventilador (27 Hz em vez de 50 Hz).

Posto isto, os dados fornecidos pelo analisador de rede, indicados na Tabela 11, vão de encontro às alterações operacionais supracitadas, isto é, tanto a potência absorvida pelo ventilador como a energia consumida foram bastante inferiores aos dados teóricos destacados no Anexo II. De acordo com a na Tabela II-1, o ventilador seria o segundo equipamento mais importante da ETAR do Ave no que diz respeito ao seu consumo energético, contudo na prática o ventilador registou o consumo de energia mais baixo (média de 101,3 kWh). Já a potência foi tão reduzida que apresentou uma diferença de 92% em relação à sua potência nominal (90 kW) resultante da redução na frequência do motor do ventilador.

4.4 PRODUÇÃO DE ENERGIA NA ETAR DO AVE

Após o estudo dos consumos energéticos segue-se a análise da energia produzida na ETAR do Ave que é conseguida através da produção de biogás e dos painéis fotovoltaicos instalados recentemente nesta planta.

Antes da implementação dos painéis fotovoltaicos, a ETAR do Ave somente produzia energia através do aproveitamento do biogás gerado na digestão anaeróbia. Posteriormente, a energia elétrica produzida no sistema de cogeração era, e continua a ser, vendida à rede elétrica nacional. A figura que se segue ilustra a variação do consumo de energia na instalação bem como a energia produzida entre janeiro de 2015 a dezembro de 2017.

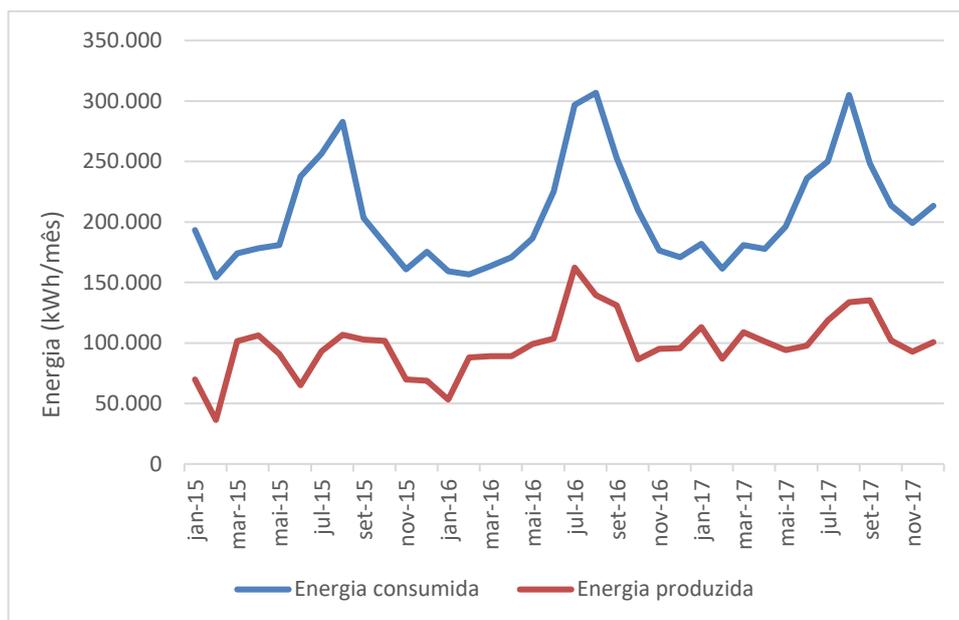


Figura 27: Energia consumida vs. Energia produzida

Através da análise do gráfico depreende-se que a energia produzida a partir do biogás não satisfaz na totalidade as necessidades energéticas da ETAR, no entanto conseguiu-se produzir, em média, cerca de 50% da energia consumida em toda a instalação, sendo os meses de abril de 2015 e janeiro e março de 2017 aqueles em se atingiram melhores resultados (produção igual ou superior a 60% da energia total consumida). O mês de julho de 2016 foi aquele que registou uma maior produção de energia na ETAR, contudo o consumo energético também foi bastante elevado. De um modo geral, pode-se ainda mencionar que entre os meses de junho a setembro o consumo de energia é bastante elevado, resultado do maior fluxo de águas residuais a tratar bem como dos critérios de qualidade do efluente final mais exigentes, o que impõe o funcionamento das lâmpadas UV para a desinfecção.

No presente ano foram instalados painéis fotovoltaicos com o intuito de melhorar a eficiência energética da instalação. A partir de fevereiro de 2018 estes equipamentos entraram em funcionamento e a energia produzida por eles é utilizada internamente para a operação de determinados equipamentos.

A quantidade de energia produzida mensalmente desde o início do ano 2018 quer por cogeração quer pelos painéis fotovoltaicos encontra-se destacada na figura seguinte assim como a energia consumida na ETAR.

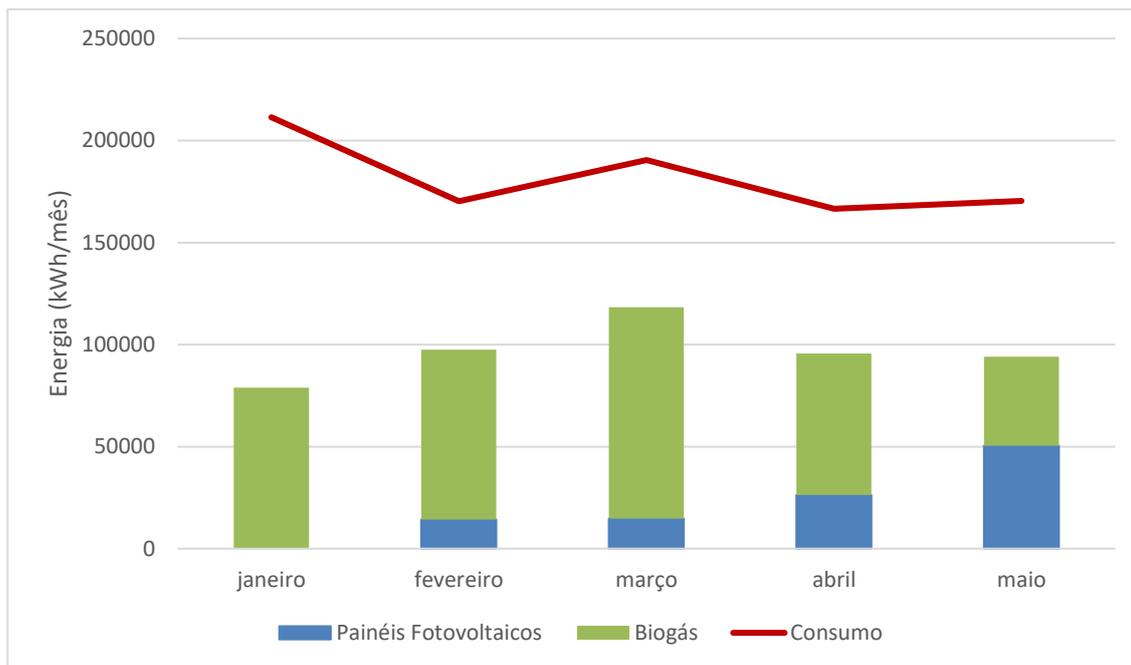


Figura 28: Dados mensais da energia produzida e da energia consumida na ETAR do Ave.

Neste momento, 22% da energia produzida na ETAR provém do funcionamento dos painéis fotovoltaicos. Segundo os dados da Tabela 4, os painéis serão capazes de produzir ao fim de um ano 490.000 kWh de energia o que equivale, em média, a mais de 40800 kWh por mês, havendo meses em que este valor será ultrapassado e outros que pelo contrário, devido às condições climáticas, serão inferiores. Analisando a Figura 18 percebe-se que apenas o mês de maio alcançou esse objetivo com uma produção total de 50.483 kWh de energia elétrica, contudo importa referir que nos restantes meses os painéis fotovoltaicos não geraram energia durante todos os dias visto que ainda se encontravam em fase de teste.

Tendo em conta o gráfico apresentado, pode-se ainda dizer que o mês de março foi aquele em que se registou uma maior produção de energia elétrica face à energia consumida, desta forma a ETAR do Ave apresentou uma autossuficiência de 62%.

De um modo global, em 2018 a energia produzida na ETAR correspondeu a 53% das necessidades energéticas da instalação. Após o funcionamento em pleno dos painéis fotovoltaicos espera-se um aumento da autossuficiência energética da instalação.

4.5 INEFICIÊNCIAS ENCONTRADAS

No decorrer do estudo das variáveis elétricas, potência e energia, dos 5 equipamentos elegidos para o efeito deparou-se, na maioria dos casos, com uma grande diferença entre a potência absorvida e a potência nominal indicada nos catálogos do fornecedor do equipamento em questão. Tal verificou-se essencialmente devido à presença de variadores

de frequência emparelhados a estes equipamentos que reduzem a velocidade de rotação dos motores e induzem a redução da potência absorvida.

Da análise efetuada aos dois parafusos de arquimedes constatou-se que, de um ponto de vista de eficiência energética, o melhor modo de operar é com uma frequência mais elevada (ainda que inferior à sua frequência nominal), visto que possibilita a redução do número de horas de operação e, conseqüentemente, do consumo energético. Dado que no 1º estágio de elevação a frequência do motor era mais reduzida verifica-se aqui uma oportunidade de melhoria. Desta forma, seria interessante testar o aumento da frequência do motor do parafuso do 1º estágio de elevação. Teoricamente, se este parafuso operar nas mesmas condições que o parafuso do 2º estágio (8,5h com uma potência de 22,7 kW) verificar-se-ia uma redução de 36,4 kWh/d no consumo energético.

A bomba de recirculação de lamas secundárias, como demonstrado no ponto 4.3.2, opera em contínuo durante 24 h/d o que não era suposto segundo os dados teóricos. Devido ao facto de hidraulicamente a linha de tratamento biológico encontrar-se a trabalhar a um caudal bastante próximo do seu caudal máximo de dimensionamento há um maior arrastamento dos sólidos presentes no tanque de arejamento para o decantador secundário. Conseqüentemente, é necessário fazer recircular as lamas novamente para o reator biológico através do aumento da taxa de recirculação de modo a garantir a concentração necessária de sólidos e voláteis neste processo. Neste caso, a taxa de recirculação é superior a 250% sendo que na fase de projeto o valor máximo selecionado foi de 150% e o médio de 75%. Assim, torna-se imperativo o controlo hidráulico deste processo biológico de modo a reduzir o consumo energético da bomba de recirculação, que se reflete no facto do consumo específico desta etapa ($0,04 \text{ kWh/m}^3$) ser bastante superior ao valor de referência da literatura ($0,02 \text{ kWh/m}^3$), conforme mencionado no capítulo 4.1. Recentemente, foi efetuada a divisão do caudal em duas linhas de tratamento pelo que se espera que com uma afinação mais cuidada das necessidades de recirculação se possa retornar aos valores estabelecidos no projeto e com isso reduzir os consumos energéticos na recirculação.

Por último, o ventilador foi o equipamento que demonstrou resultados mais distintos dos dados teóricos por isso tornou-se importante analisar no caderno de encargos do projeto da ETAR como consistiu o dimensionamento do sistema de ventilação. Esta análise permitiu perceber o seguinte:[57]

- o número mínimo de renovações de ar por hora nas zonas de circulação das salas onde há produção de odores é 5, de forma a garantir concentrações de sulfureto de hidrogénio, mercaptanos e amoníaco inferiores aos valores médios de exposição que um trabalhador deve estar exposto;
- o caudal de ar a tratar é $51.195 \text{ Nm}^3/\text{h}$, no entanto quando há necessidade de fazer manutenção no tanque de lamas mistas este caudal aumenta para $62.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- para efeitos de dimensionamento do sistema de desodorização considerou-se que o caudal de ar a tratar é $64.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Posto isto, percebe-se claramente que o ventilador presente na ETAR encontra-se sobredimensionado. Apesar de teoricamente os parâmetros impostos no caderno de encargos estarem dentro do normal em projetos da especialidade, na realidade em termos operacionais o ventilador está a operar a velocidades muito baixas e, portanto, a taxas de recirculação e caudais muito inferiores aos dimensionados, o que demonstra que no caderno de encargos os parâmetros não necessitam de ser tão exigentes. Por um lado, as zonas onde é possível a circulação de pessoas tem um grande número de renovações de ar sem que seja realmente necessário visto que na grande parte do tempo não se encontra ninguém nestes espaços. Por outro lado, o caudal de ar considerado é cerca de 20% superior ao inicial devido à operação casual de manutenção do tanque de lamas mistas. Portanto, tudo isto levou a um grande investimento inicial quer no ventilador quer em toda a tubagem e cabos elétricos associados ao sistema de desodorização que, com certeza, não seria necessário. A aquisição de um ventilador de menor potência teria proporcionado um menor investimento inicial, mecânico e elétrico, e uma melhor eficiência energética uma vez que o ventilador iria estar a operar no ponto para o qual foi dimensionado. A monitorização da concentração de gases tóxicos presente nas salas a desodorizar poderá ser uma possível melhoria da eficiência energética do ventilador visto que a sua operação passaria a ser dependente das necessidades reais de ventilação.

4.6 PROPOSTAS DE SOLUÇÕES

Por último, depois do estudo dos principais consumos energéticos na ETAR bem como da quantidade de energia gerada através da produção de biogás e dos painéis fotovoltaicos resta apresentar algumas possíveis soluções, tanto operacionais como tecnológicas, que visam o aumento da eficiência energética da instalação.

4.6.1 REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO AREJAMENTO

Dado a elevada quantidade de energia despendida diariamente para o funcionamento do sobrepessor (37% do consumo total da planta) torna-se importantíssimo encontrar soluções que permitam reduzir o consumo energético da fase de arejamento.

Uma forma de reduzir o consumo energético associado ao arejamento do reator biológico consiste em alargar o período de paragem do sobrepessor. Assim, é importante estudar quais as necessidades reais de arejamento e comparar com o caudal de ar fornecido pelo sobrepessor de êmbolos rotativos que se encontra na ETAR.

O oxigénio necessário para remover a matéria carbonácea presente no reator biológico pode ser calculado pela seguinte expressão:[58, p. 596]

$$R_o = Q(S_0 - S) - 1,42 P_{x,bio} \quad (1)$$

Em que,

R_o = quantidade total de oxigénio requerida, g/d

Q = caudal de efluente, m³/d

S_0 = concentração de CQO biodegradável à entrada do reator biológico, mg/L

S = concentração de CQO biodegradável à saída da ETAR, mg/L

$P_{X,bio}$ = biomassa desperdiçada, g/d

As lamas desperdiçadas diariamente podem ser calculadas da seguinte forma:[58, p. 594]

$$P_{X,bio} = \frac{QY(S_0 - S)}{1 + k_d \cdot SRT} + \frac{fd \cdot kd \cdot QY(S_0 - S) \cdot SRT}{1 + k_d \cdot SRT} \quad (2)$$

Os cálculos foram efetuados utilizando os dados processuais do mês de abril de forma a permitir uma posterior comparação mais fidedigna com as medições efetuadas no sobrepressor.

Para o cálculo da CQO biodegradável (CQO_b) utilizou-se o rácio expresso abaixo: [58, p. 669-670]

$$\frac{CQO_b}{CBO_5} = 1,6 - 1,7 \quad (3)$$

Assim, tendo em consideração os dados do mês de abril relativos ao caudal, temperatura do efluente, CBO_5 à saída da decantação primária e CBO_5 à saída da ETAR (parâmetro legislado) foi possível calcular a quantidade teórica de oxigénio necessária para o tanque de arejamento utilizando as equações indicadas anteriormente.

$$R_o = 14480 \times (326,4 - 42,5) - 1,42 \times 1331379 \Leftrightarrow R_o = 2220313 \text{ g } O_2/d \Leftrightarrow R_o = \mathbf{2220 \text{ kg } O_2/d}$$

Posteriormente, é necessário retificar o resultado obtido pois a quantidade real de oxigénio requerida ($SOTR$) é influenciada por diversos fatores, tais como efeito salinidade-tensão superficial, temperatura, elevação, profundidade dos difusores, configuração do tanque de arejamento, entre outros. A inter-relação entre estes fatores é dada pela equação que se segue:[58, p. 429]

$$SOTR = \frac{AOTR \cdot C_{s,20}}{(\beta C_{s,T,H} - C_L) \cdot (1,024^{T-20}) \cdot \alpha \cdot F} \quad (4)$$

$$SOTR = \frac{2220 \cdot 9,08}{(0,95 * 10,94 - 2) \cdot (1,024^{17,4-20}) \cdot 0,6 \cdot 0,9} \Leftrightarrow SOTR = \mathbf{4731 \text{ kg } O_2/d}$$

Os cálculos intermédios que não foram aqui apresentados encontram-se no Anexo III.

Por fim, o caudal de ar a fornecer pelo sobrepessor aos difusores presentes no tanque de arejamento é calculado pela expressão seguinte:

$$Q_{ar \text{ necessário para oxigenação}} = \frac{SOTR}{\text{Rendimento de transferência real}} \quad (5)$$

sendo que o rendimento é dependente da capacidade de transferência de O₂ dos difusores instalados na ETAR (15 g O₂/m³/m) e da profundidade do tanque de arejamento (6,5 m). Assim,

$$Q_{ar \text{ necessário para oxigenação}} = \frac{4731}{97,5} \Leftrightarrow Q_{ar \text{ necessário para oxigenação}} = 48526 \text{ m}^3 \text{ ar/d}$$

Sabendo que o sobrepessor opera a um caudal de 7400 m³ ar/h chega-se à conclusão de que são necessárias 6,56 horas de arejamento para remover a matéria orgânica presente no efluente.

Por fim, na Tabela 12 é possível constatar as diferenças entre as necessidades teóricas calculadas e o arejamento atual na ETAR.

Tabela 13: Comparação entre os dados reais e teóricos relativos ao arejamento

	Dados reais	Dados teóricos
Tempo de arejamento (h/d)	9,63	6,56
Potência média (kW)	202	
Energia consumida (kWh/d)	1941	1325
Diferença (kWh/d)	616	

Os resultados presentes na tabela indicam que no mês de abril o sobrepessor encontrou-se em operação aproximadamente mais 3 horas do que o necessário teoricamente. Caso o tempo de arejamento fosse reduzido para as necessidades reais, demonstradas pelos cálculos teóricos, haveria uma poupança de 616 kWh de energia elétrica por dia.

Este estudo permitiu mostrar que o arejamento na ETAR do Ave é, por vezes, superior ao necessário para remover a carga orgânica presente no efluente pelo que existe uma margem de melhoria da eficiência energética neste processo.

Outra possível ação para aumentar a eficiência energética no arejamento seria aumentar a eficiência de remoção de matéria orgânica da etapa a montante, isto é, da decantação primária. Quanto maior a quantidade de sólidos e matéria orgânica retida nos decantadores primários menor será a quantidade destes no tanque de arejamento. Posto isto, a quantidade de OD a fornecer às bactérias para a degradação da carga orgânica poderá ser reduzida o que, naturalmente, permite a redução do consumo energético do tratamento secundário. Além disso, o aumento da eficiência da decantação primária tem ainda a vantagem de conduzir à produção de lamas primárias com um maior teor de matéria orgânica, capazes de produzir

mais energia. Assim, a otimização da etapa de decantação apresenta benefícios em dois sentidos, por um lado, há uma maior produção de lamas primárias ricas em matéria orgânica que irão levar ao aumento da produção de biogás na instalação e, por outro, há uma poupança de energia no tratamento biológico com a diminuição das necessidades de oxigênio.[27,37, 59]

Tendo isto em conta, começou-se por efetuar um balanço mássico na decantação primária (Figura 29) com o intuito de perceber se as eficiências atuais de remoção de CBO₅, CQO e SST estariam de acordo com o pressuposto na fase de projeto (25%, 49% e 25% respetivamente). Estas eficiências podem ser calculadas segundo as equações 6, 7 e 8.

$$\eta_{CBO_5} = \frac{CBO_{5,e} - CBO_{5,s}}{CBO_{5,e}} \quad (6)$$

$$\eta_{CQO} = \frac{CQO,e - CQO,s}{CQO,e} \quad (7)$$

$$\eta_{SST} = \frac{SST,e - SST,s}{SST,e} \quad (8)$$

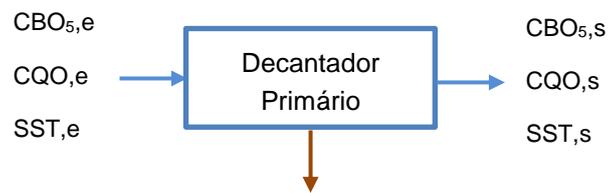


Figura 29: Balanço mássico no decantador primário.

Na tabela seguinte estão apresentadas as concentrações de CBO₅, CQO e SST à entrada e à saída da decantação primária bem como o rendimento de remoção respetivo, calculado pelas expressões anteriores.

Tabela 14: Eficiência de remoção de CBO₅, CQO e SST na decantação primária

	Entrada (mg/L)	Saída (mg/L)	Rendimento (%)
CBO₅	367	253	31
CQO	659	435	34
SST	224	118	47

Analisando os resultados obtidos, indicados na Tabela 13, apenas a eficiência de remoção de SST está ligeiramente abaixo do que era suposto (49%). Contudo, segundo determinadas fontes bibliográficas, a eficiência de remoção de CBO₅ na decantação primária varia entre 25-50% enquanto que para os SST varia ente 50-65% indicando que os valores dos rendimentos elegidos na fase de projeto da ETAR são um pouco conservadores.[60–62] Deste modo, há ainda uma margem para melhoria das eficiências da decantação primária na ETAR do Ave.

A adição de um coagulante promove a agregação das partículas a remover tornando o seu peso específico superior ao da água o que facilita a sua decantação. Para o aumento da eficiência de remoção de CBO₅ e SST na decantação primária na ETAR do Ave testou-se

teoricamente as implicações processuais da adição do coagulante Cloreto de Ferro no que diz respeito à formação de lamas químicas.

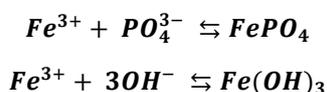
Tendo em conta a quantidade de fósforo existente na água bruta, a que sai no efluente final e a que é assimilada no reator biológico é possível calcular a quantidade de fósforo que necessita de ser removida quimicamente.

$$P_{\text{remover quimicamente}} = P_{\text{água bruta}} - P_{\text{saída}} - P_{\text{assimilado}} \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow P_{\text{remover quimicamente}} = 8,53 - 4,08 - 1,14$$

$$\Leftrightarrow P_{\text{remover quimicamente}} = \mathbf{3,31 \text{ kg/d}}$$

Quando se utiliza ferro para a remoção de fósforo ocorrem as seguintes reações químicas:[58, p. 511]



Desta forma, as espécies químicas presentes nas lamas são FePO_4 e $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Assim, com a adição de Cloreto de Ferro a quantidade de lamas químicas formadas é calculada da seguinte forma:

$$\text{Quantidade de lamas químicas} = n_{\text{FePO}_4} * M_{\text{FePO}_4} + n_{\text{FeOH}_3} * M_{\text{FeOH}_3} \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow \text{Quantidade de lamas químicas} = (107 * 150,8 + 107 * 106,8) * 10^{-3}$$

$$\Leftrightarrow \text{Quantidade de lamas químicas} = \mathbf{27,5 \text{ kg/d}}$$

Considerando uma concentração de lamas de $3,5 \text{ kg/m}^3$ o caudal de lamas químicas formadas é de $7,9 \text{ m}^3/\text{d}$. Dado que este caudal não se trata de um valor significativo pode-se afirmar que a adição de coagulante não causa transtornos no tratamento de lamas a jusante.

Os restantes cálculos intermédios encontram-se no Anexo III.

Não é possível prever teoricamente o efeito da adição de coagulante na eficiência da decantação primária. Para tal seria necessário recorrer a ensaios laboratoriais, como *jar-test*, para determinar a dose ótima de coagulante a adicionar ao processo. Contudo, segundo a bibliografia consultada a eficiência de remoção de CBO_5 poderia ser melhorada, desta forma estudou-se qual seria o efeito nos consumos energéticos da etapa de arejamento caso, com a adição de coagulante, a eficiência aumentasse de 31% para 40%. Para este estudo foram utilizadas as equações 1 a 5 e os dados de operação do mês de abril sendo que apenas a variável S_0 foi alterada.

A concentração de CQO biodegradável foi calculada seguindo a equação 6 e 3, respetivamente:

$$0,40 = \frac{273 - \text{CBO}_{5,s}}{273} \Leftrightarrow \text{CBO}_{5,s} = \mathbf{163,8 \text{ mg/L}}$$

$$\frac{CQO_b}{163,8} = 1,7 \Leftrightarrow CQO_b = S_0 = 278,5 \text{ mg/L}$$

Mantendo todos os outros parâmetros constantes obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 15: Diferença de arejamento quando a eficiência de remoção de CBO₅ aumenta de 31 para 40%.

	31% de eficiência	40% de eficiência
Qar para oxigenação (m ³ ar/d)	48.526	40.332
Tempo de arejamento (h/d)	6,56	5,45
Potência média (kW)	202	
Energia consumida (kWh/d)	1325	1103
Diferença (kWh/d)	222	

Os resultados indicados na Tabela 14, permitem concluir que um aumento de 9% na eficiência de remoção de CBO₅ na decantação primária conduzem a uma redução de 222 kWh/d de energia elétrica consumida pelo sobrepessor presente na ETAR do Ave. Deste modo, comprovou-se que a melhoria da etapa de decantação primária conduz à redução das necessidades de arejamento no reator biológico e, conseqüentemente, dos consumos energéticos associados a esta etapa de tratamento. Importa ainda referir que estes ganhos energéticos podem não compensar monetariamente os gastos associados à compra do coagulante e do equipamento necessário para o seu doseamento., contudo o aumento da eficiência energética é assegurado.

4.6.2 OPTIMIZADOR DE SECAGEM DE LAMAS

Com o intuito de otimizar e automatizar o processo de desidratação de lamas em ETARs a Valmet desenvolveu a tecnologia Otimizador de Secagem de Lamas Valmet (Valmet SDO) que consiste na implementação de um software de controlo na etapa de desidratação, associada à instalação de medidores de sólidos totais à entrada da centrifuga bem como dos sólidos presentes nas lamas desidratadas e nas escorrências. Esta tecnologia apresenta ainda uma série de vantagens:[63]

- Redução dos custos de transporte de lamas;
- Utilização mais eficiente de polímeros e conseqüente poupança nos custos;
- Melhor eficiência energética e desempenho das centrifugas;
- Maior sustentabilidade do processo;
- Menor necessidade de amostragem laboratorial;
- Dados permanentes em tempo real sem necessidade de um operador;
- Período curto de retorno do investimento principalmente em ETARs de grandes dimensões.

Posto isto, de forma a reduzir o consumo energético associado à etapa de desidratação de lamas, surgiu o interesse em analisar técnica e economicamente esta tecnologia com vista à sua aplicação na ETAR do Ave.

Sendo assim, após uma reunião com um responsável da Valmet, procedeu-se ao preenchimento de um formulário com dados relativos aos fluxos de lamas que entram na unidade de desidratação e aos sólidos finais resultantes do processo. Além disso, de modo a perceber se esta tecnologia seria vantajosa do ponto de vista económico, foram também fornecidos dados referentes aos custos relacionados com o consumo de energia e de polímero. A informação presente no formulário a respeito do funcionamento da desidratação e os esquemas técnicos da ETAR do Ave permitiram então a realização do estudo de viabilidade de instalação da tecnologia Valmet SDO.

Os resultados do estudo, presentes no Anexo IV, demonstraram que a instalação desta tecnologia é capaz de proporcionar grandes poupanças para a ETAR do Ave, principalmente no que diz respeito à redução do uso de polímero e da necessidade de transporte de lamas. As poupanças energéticas verificadas devem-se à otimização da taxa de captura dos sólidos na desidratação, isto é, à diminuição da quantidade de sólidos presente nas escorrências que retornam ao início do processo de tratamento.

Na Fig.IV-1 pode-se visualizar os custos operacionais atuais na ETAR referentes à unidade de desidratação (10 €/h), que consistem essencialmente em custos energéticos, e as poupanças operacionais conseguidas com a instalação da Valmet SDO (1352 €/ano), isto é, reduções no consumo de energia durante o processo. Posto isto, e sabendo que a centrífuga opera com uma potência média de 15 kW conclui-se que a implementação desta tecnologia permite reduzir 2028 kWh/ano. Apesar desta tecnologia não proporcionar grandes melhorias a nível energético, não deixa de ser vantajosa a sua implementação na ETAR tendo em conta todos os outros ganhos. Além disso, as poupanças geradas permitem um abatimento do custo de investimento ao fim de 4 anos.

4.6.3 HIDRÓLISE TÉRMICA EM CONTÍNUO EXELYS™

Os pré-tratamentos de lamas são métodos eficientes que permitem melhorar a digestão anaeróbia. Contudo, apesar de proporcionarem um aumento na produção de biogás é necessário ter em consideração que o pré-tratamento implementado também terá gastos energéticos que nem sempre são amortizados pelo aumento de energia elétrica produzida.[35] Nas últimas décadas, os pré-tratamentos térmicos, como é o caso da hidrólise térmica, quando combinados com a digestão anaeróbia têm sido reconhecidos como soluções fiáveis e energeticamente eficazes visto que a energia necessária para a realização do tratamento térmico pode ser equilibrada positivamente pela produção de biogás.[35,64]

A tecnologia Exelys™, desenvolvida pela Krüger A/S em conjunto com a Veolia, constitui um sistema de hidrólise térmica de lamas em contínuo capaz de otimizar o processo de

digestão anaeróbia. Como já supracitado no ponto 2.4.1, a hidrólise corresponde à etapa limitante da reação de digestão de lamas, portanto a melhoria do rendimento desta etapa torna os substratos mais acessíveis às bactérias anaeróbias acelerando a digestão.[36] Conseqüentemente, há um aumento do volume de biogás produzido (30 a 50%) e uma redução da quantidade de lamas a eliminar (25 a 35%).[65]

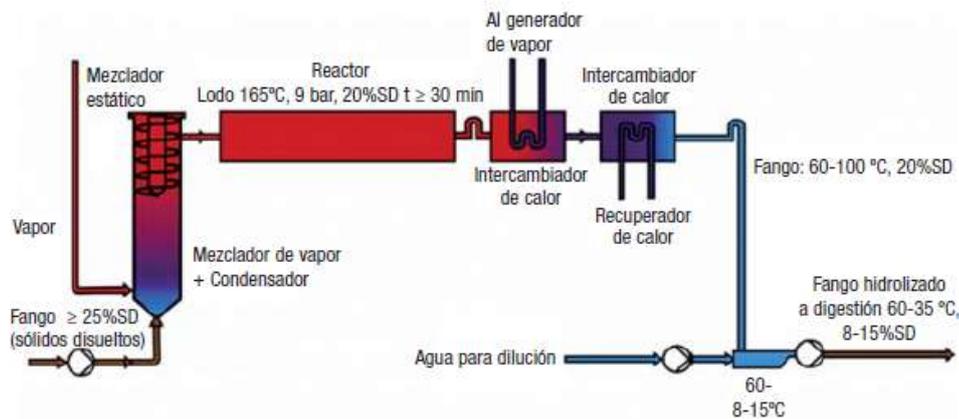


Figura 30: Sistema de hidrólise térmica Exelys™.[64]

Quanto ao processo Exelys™, ilustrado na Figura 30, as lamas previamente desidratadas são bombeadas continuamente para o sistema onde é injetado vapor que condensa nas lamas e aquece-as. Posteriormente, as lamas aquecidas passam por um misturador estático que garante uma distribuição uniforme de calor e captura qualquer vapor que não tenha sido condensado anteriormente. As lamas são depois enviadas para o reator, que opera num intervalo de temperaturas de 140-165°C e a pressões entre 8,96-11,25 bar. Dentro do reator as lamas fluem a uma velocidade muito reduzida que assegura a sua exposição às condições de hidrólise durante o tempo de residência necessário (aproximadamente 30 min). À saída do reator, as lamas são arrefecidas através de um permutador de calor e, por fim, com a adição de água residual tratada de modo a diluí-las e arrefece-las para o processo de digestão anaeróbia. Assim, garante-se a proteção dos digestores contra mudanças bruscas de temperatura, assegurando a estabilidade do processo e longevidade do equipamento.[36,64]

Por norma o sistema Exelys™ é instalado a montante do digestor podendo ser utilizadas todas as lamas produzidas na ETAR ou somente as lamas biológicas. Caso o objetivo seja principalmente aumentar a produção de eletricidade existe ainda outra configuração de processo em que o sistema Exelys™ é incorporado entre os dois digestores.[36] Estas três configurações encontram-se representadas no Anexo V.

Em suma, esta tecnologia apresenta as seguintes vantagens:

- Operação contínua durante 24 h/dia;
- Aumento da capacidade do digestor;
- Redução de custos operacionais devido à redução do volume de lamas a transportar;

- Redução de custos em produtos químicos devido à melhoria de desidratação de lamas;
- Aumento da produção de biogás.

Posto isto, esta tecnologia poderá ser uma solução interessante a implementar na ETAR do Ave com vista ao aumento da eficiência energética da instalação. No entanto, apesar das vantagens enumeradas, é importante ter em atenção que há um consumo energético associado a esta tecnologia que não se sabe se é totalmente abatido pela produção acrescida de biogás na planta. Para a operação deste sistema é necessário, primeiro de tudo, desidratar as lamas, que no caso da ETAR do Ave é feita recorrendo a uma centrifuga que atualmente apresenta um consumo médio de sensivelmente 150 kWh. Além disto, depois da etapa de digestão continua a ser necessário desidratar as lamas antes da sua eliminação final. A introdução de vapor para condensar as lamas requer também um consumo adicional de energia que pode, no entanto, ser fornecido através do cogrador. Assim, de modo a entender se do ponto de vista energético a implementação deste sistema na ETAR é ou não viável a Veolia procedeu à realização de um estudo mais aprofundado.

O estudo da Veolia consistiu na análise de três cenários distintos:

- 1) Digestão anaeróbica mesofílica, que consiste na situação de referência para posterior comparação;
- 2) Exelys LD, em que as lamas primárias e biológicas são hidrolisadas termicamente (Figura. V-1);
- 3) Exelys LDbio, em que somente as lamas biológicas são hidrolisadas termicamente (Figura. V-2).

Os resultados do estudo realizado foram os seguintes:

- A configuração Exelys LD permitiu aumentar cerca de 30% a produção de biogás e reduzir a quantidade de lamas cerca de 40%. Devido à utilização do biogás na produção de vapor para o reator de hidrólise térmica, o aumento na produção de eletricidade é insignificante;
- A configuração Exelys LDbio permitiu aumentar a produção de biogás cerca de 27% e reduziu a quantidade de lamas em 33%. Neste caso, a produção de eletricidade aumentou aproximadamente 18%;
- Ambas as configurações necessitam de uma linha Exelys que inclui, para além do reator, um silo de lamas, uma bomba de alimentação e um gerador de vapor cujo investimento ronda os 1,7 milhões de euros.

Tendo em conta os resultados supracitados pode-se concluir que a configuração Exelys LDbio é a mais vantajosa para o aumento da eficiência energética da ETAR do Ave. Resta, por fim, analisar qual é o tempo de amortização deste investimento. Sabendo que a diminuição da quantidade de lamas (76.820 kg/mês) irá permitir reduzir os gastos no seu transporte e que há um aumento na produção de eletricidade na instalação (19.260 kWh/mês) que é

posteriormente vendida à rede elétrica nacional, pode-se então calcular uma estimativa do período de retorno do investimento:

$$\text{Período de retorno} = \frac{\text{Custo da tecnologia}}{\text{Poupança transporte lamas} + \text{Ganho venda energia}} \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow \text{Período de retorno} = \frac{1.700.000}{21.663 + 181.814}$$

$$\Leftrightarrow \text{Período de retorno} = \mathbf{8,4 \text{ anos}}$$

A implementação desta tecnologia requer um enorme investimento que apenas é recuperado ao fim de 8,4 anos. Como a ETAR do Ave será explorada pela Efacec por apenas mais 6 anos conclui-se que esta tecnologia, apesar das vantagens comprovadas pelo estudo efetuado, não será uma opção a considerar pela Efacec para o futuro aumento da eficiência energética da sua instalação.

4.6.4 MICRO CENTRAL HIDRÁULICA

Como referido na secção 2.4.2.2, a instalação de uma micro central hidráulica numa ETAR pode ser feita a montante ou a jusante do tratamento das águas residuais. No caso da ETAR do Ave testou-se teoricamente se seria vantajoso a implementação de uma microturbina no descarregador que encaminha o efluente final tratado para o rio Ave. Sabendo que este descarregador apresenta uma diferença de cotas de 5 metros e que o caudal médio de efluente tratado descarregado diariamente na ETAR é 0,16 m³/s, pode-se então estimar a potência da turbina recorrendo à equação 12:[41,45,66]

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta \quad (12)$$

onde,

P é a potência (W),

ρ é a densidade da água (kg/m³),

g é a aceleração da gravidade (m/s²),

Q é o caudal de água (m³/s),

H é a altura de queda (m),

η é a eficiência global do sistema (%).

Segundo a literatura, a eficiência destes microssistemas hidroelétricos varia entre 60% e 80%,[41] deste modo para o cálculo da potência considerou-se o valor médio de 70%. Assim,

$$P = 1000 \times 9,81 \times 0,16 \times 5 \times 0,7 \Leftrightarrow P = \mathbf{5,6 \text{ kW}}$$

Considerando que a turbina se encontra em funcionamento durante 24h/dia a energia gerada diariamente seria:

$$E = P \times 24 \Leftrightarrow E = 5,6 \times 24 \Leftrightarrow E = \mathbf{134,4 \text{ kWh}}$$

Para uma potência instalada inferior a 100 kW o investimento unitário numa micro central hídrica encontra-se entre os 1500 €/kW e os 6000 €/kW. A energia elétrica resultante da operação da turbina é injetada na rede elétrica nacional com um preço de venda entre os 0,06-0,07 €/kWh.[66] Assim, considerando os respetivos valores médios calculou-se o período de retorno do investimento:

$$\text{Período de retorno} = \frac{\text{Investimento total}}{\text{Ganho anual}} \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow \text{Período de retorno} = \frac{3750 \times 5,6}{0,065 \times 134,4 \times 365}$$

$$\Leftrightarrow \text{Período de retorno} = \mathbf{6,6 \text{ anos}}$$

O investimento para a instalação de uma microturbina na ETAR do Ave pode ser recuperado, na melhor das hipóteses, ao fim de 6,6 anos. Este resultado é bastante otimista dado que não contabiliza possíveis gastos em construção civil para a adequação estrutural do descarregador da ETAR e ainda considera que a turbina se encontra em operação 24 h/dia durante todo o ano. Caso se considerasse que esta turbina opera apenas durante 3000 h/ano (valor médio usual, [66]) o período de retorno subiria para 19,2 anos.

Tendo em consideração os resultados obtidos, concluiu-se que não será viável investir na implementação de uma minicentral hidroelétrica na ETAR do Ave.

4.7 IMPACTO ENERGÉTICO DAS MELHORIAS E SOLUÇÕES PROPOSTAS

Neste subcapítulo será apresentado um resumo dos ganhos de eficiência energética que a ETAR do Ave conseguiria caso implementasse as melhorias e medidas sugeridas nos pontos 4.5 e 4.6 da presente dissertação. Estas sugestões apresentam um impacto nos consumos energéticos da planta bem como na sua capacidade de gerar energia elétrica internamente.

Tabela 16: Impacto mensal das melhorias sugeridas no consumo e produção de energia

	Energia (kWh/mês)
Parafuso 1º estágio	- 1.092
Redução do tempo de arejamento	- 18.480
Adição de coagulante	- 6.660
Tecnologia Valmet SDO	- 169
Redução total no consumo	- 26.401
Tecnologia Exelys	+ 19.260
Aumento total na produção	+19.260

Como demonstrado na tabela, 4 das 5 sugestões apresentadas contribuem para a redução do consumo de energia enquanto que a restante permite aumentar a produção de energia limpa na instalação. A redução da necessidade de arejamento e a implementação da tecnologia Exelys são as que apresentam uma maior importância para a melhoria da eficiência energética da instalação.

De referir que os resultados obtidos resultam de estudos teóricos e/ou da extrapolação dos dados obtidos pelo analisador de rede pelo que há uma margem de erro associada aos valores apresentados na Tabela 15. Por um lado, para a realização dos estudos utilizaram-se dados operacionais como o caudal de efluente tratado ou a quantidade de CBO₅ a remover que como se sabe tratam-se de parâmetros bastante variáveis ao longo do tempo. Por outro lado, os dados obtidos das medições nos equipamentos apresentam também um erro associado ao próprio analisador de rede e também ao respetivo quadro elétrico. Assim, apesar de ser difícil de contabilizar esta margem de erro é importante não esquecer que esta existe.

De seguida, apresenta-se uma análise comparativa entre a situação da ETAR do Ave no ano de 2017 (sem melhorias) e após a implementação das melhorias implementadas recentemente (painéis fotovoltaicos) e das sugestões indicadas na Tabela 15.

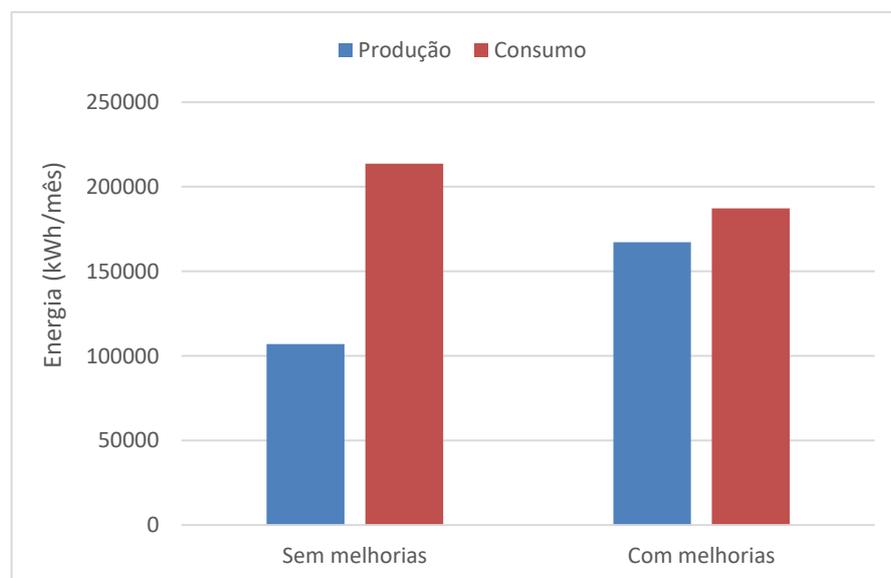


Figura 31: Consumo e produção de energia com e sem a implementação das melhorias propostas.

Em 2017, o consumo energético médio mensal excedeu os 213.000 kWh e apenas se produziu metade da energia requerida para as necessidades da planta (107.000 kWh). Após a instalação dos painéis fotovoltaicos (produção média de 40.800 kWh/mês) e da implementação das medidas propostas verifica-se uma redução nos consumos energéticos e um aumento na produção de energia obtendo-se uma autossuficiência energética de 89% (diferença de 39% relativamente ao ano de 2017).

A redução dos requisitos energéticos da ETAR do Ave para além de apresentar vantagens económicas devido à redução dos custos energéticos e operacionais permite ainda contribuir para a redução das emissões de CO₂ para a atmosfera, que podem ser calculadas pela seguinte equação:

$$\text{Emissões evitadas de CO}_2 = \text{Consumo de energia} \times \text{Fator de emissão de CO}_2 \quad (14)$$

Sabendo que o fator de emissão de CO₂ para o consumo de eletricidade em Portugal é de 0,369 tCO₂/MWh foi então possível estimar as emissões evitadas de CO₂ para a atmosfera. [67] Assim, com a implementação das medidas destacadas na Tabela 15 há uma redução de 26.401 kWh/mês de energia elétrica consumida o que equivale a 9,7 tCO₂. Por outro lado, a produção de energia limpa através da implementação da tecnologia Exelys e dos painéis fotovoltaicos contribui para a minimização do consumo de eletricidade da rede elétrica nacional pelo que indiretamente evita-se a emissão de 22,2 tCO₂ para a atmosfera, por mês.

5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Atualmente, o aumento contínuo dos custos da energia e os requisitos de qualidade dos efluentes cada vez mais exigentes conduzem a elevados gastos energéticos nas ETARs. Perante este problema, a minimização dos consumos de energia através da implementação de medidas de eficiência energética, da valorização energética dos subprodutos gerados nas etapas de tratamento e da aposta em energias renováveis revela-se cada vez mais importante para melhorar o desempenho energético das ETARs. Posto isto, este estudo pretendeu contribuir para a otimização do comportamento energético da ETAR do Ave através da análise dos consumos energéticos da planta e da sugestão de possíveis melhorias a efetuar na instalação.

Da análise dos consumos energéticos por quadro elétrico chegou-se à conclusão de que 45% do consumo energético da ETAR diz respeito ao arejamento do tratamento biológico, seguindo-se a etapa de elevação inicial e tratamento preliminar com 22,8% e o tratamento de lamas com 14,7%.

De seguida, passou-se para a análise das potências de todos os equipamentos disponíveis na ETAR do Ave sendo que se selecionaram os 5 equipamentos que continham uma potência instantânea mais elevada para posterior estudo dos seus consumos energéticos atuais. Os equipamentos selecionados para o estudo mais pormenorizado foram: sobressor de êmbolos rotativos, bomba centrífuga de recirculação de lamas, parafuso de arquimedes do 1º e 2º estágio de elevação, centrífuga e ventilador. O maior consumo energético foi registado pelo sobressor (média de 1941 kWh/d) representando na globalidade 37% do consumo elétrico da ETAR do Ave. Visto que as medições com o analisador de rede foram efetuadas durante a época baixa é de esperar que durante os meses de julho, agosto e setembro a energia consumida seja superior. Pelo contrário, dos 5 equipamentos analisados, o ventilador da etapa de desodorização apresentou o consumo de energia mais baixo (média de 101,3 kWh/d) devido à redução do número de renovações de ar face ao descrito no caderno de encargos, à diminuição da frequência do motor e à sua operação apenas durante o período diurno.

Após o estudo dos consumos energéticos, investigou-se a produção de energia na ETAR conseguida através do sistema de cogeração e dos painéis fotovoltaicos recentemente instalados. Até ao momento a energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos corresponde a 22% da energia total produzida na ETAR sendo que se espera que este resultado aumente no 2º semestre do ano, dado que até ao final do mês de abril os painéis ainda não se encontravam em funcionamento integral devido à realização de testes no equipamento. Comparativamente com os consumos de energia na instalação, a energia total produzida satisfaz 53% das necessidades energéticas da ETAR.

Quanto às ineficiências encontradas, apurou-se em todos os 5 equipamentos uma diferença significativa entre a potência absorvida e a potência nominal dos equipamentos resultante da redução da frequência dos seus motores pelos variadores de frequência instalados, indicando que estes equipamentos não se encontram a operar no seu ponto de melhor eficiência para o qual foram dimensionados. Além disso, verificou-se que o modo de operação do parafuso do 1º estágio não é tão eficiente energeticamente como o do 2º estágio de elevação pelo que um aumento da frequência do motor do parafuso do 1º estágio seria uma possível oportunidade de melhoria a averiguar. O funcionamento de apenas uma linha de tratamento com um caudal muito próximo do seu caudal máximo sobrecarrega o funcionamento da bomba de recirculação uma vez que tem de satisfazer taxas de recirculação superiores a 250%. A divisão do caudal em duas linhas de tratamento e o seu controlo hidráulico permitirá retomar aos valores de recirculação selecionados na fase de projeto e com isso reduzir os consumos energéticos da bomba de recirculação. Por último, a leitura do caderno de encargos permitiu concluir, juntamente com os resultados obtidos pelo analisador de rede, que o ventilador presente na ETAR encontra-se sobredimensionado. De forma a contornar isto, poder-se-ia adquirir um novo equipamento de menor potência. Em alternativa, o funcionamento do ventilador de acordo com as concentrações de gases tóxicos presente nos espaços a desodorizar também pode ser uma opção para melhorar a sua eficiência.

De seguida, realizou-se o estudo da implementação de medidas operacionais alternativas às existentes atualmente na ETAR e de novas tecnologias que possam ser aplicadas com o intuito de melhorar a eficiência energética da instalação. Deste modo, as soluções encontradas centraram-se por um lado na redução do consumo energético no arejamento do tratamento biológico e na etapa de desidratação e por outro na produção de energia na ETAR através da otimização da digestão anaeróbia e da instalação de uma central mini-hídrica.

Para a redução do consumo energético no arejamento foram estudados dois cenários distintos: redução do tempo de funcionamento do sobreprensor tendo em conta as necessidades reais de oxigénio para o tanque de arejamento e adição de um coagulante para melhorar a eficiência de remoção da decantação primária. Através dos cálculos teóricos efetuados comprovou-se que seria possível diminuir cerca de 3 horas o tempo de operação do sobreprensor o que permitiria assim reduzir 616 kWh/dia no consumo de energia na etapa de arejamento. Já o aumento de 9% na eficiência de remoção de CBO₅ na etapa de

decantação primária permitiria reduzir a quantidade de matéria orgânica a degradar no tratamento biológico o que corresponde a uma redução de 222 kWh/dia no consumo energético do sobrepessor. Contudo, importa salientar que nestes dois estudos para o cálculo da redução do consumo energético do sobrepessor utilizou-se como situação de referência o consumo energético médio verificado entre os dias 24 a 26 de abril que foi posteriormente extrapolado para todo o mês de abril. Esta extrapolação pode não ser a mais correta visto que o comportamento registado nestes 3 dias pode não ser representativo dos restantes dias do mês. Em relação ao estudo da adição de coagulante, considerou-se para os cálculos um aumento de eficiência de 9%, no entanto não se sabe se na prática este valor é realista.

Para a otimização energética da etapa de desidratação a Valmet realizou um estudo para testar a viabilidade da implementação da tecnologia Valmet SDO na ETAR do Ave. Os resultados demonstraram que esta tecnologia apresenta grandes vantagens no que respeita à redução do uso de polímero e do transporte de lamas, contudo a nível energético proporciona apenas uma redução de 169 kWh/mês.

A melhoria da digestão anaeróbia e conseqüente aumento da produção de biogás na planta pode ser conseguida através de um pré-tratamento de hidrólise térmica. A tecnologia Exelys constitui um sistema em contínuo de hidrólise térmica que pode ser implementado em várias configurações sendo que os resultados do estudo efetuado pela Veolia permitiram concluir que a melhor configuração a instalar seria aquela que utiliza apenas as lamas biológicas geradas na ETAR. Esta configuração promove um aumento de 18% na produção de energia elétrica o que corresponde a 19.260 kWh/mês.

A instalação de uma minicentral hidráulica no descarregador do efluente final presente na ETAR do Ave mostrou-se tratar de uma opção inviável já que a energia produzida diariamente era bastante reduzida para compensar o investimento.

Em suma, ainda que a ETAR do Ave se encontre longe de alcançar a independência energética apresenta capacidade de melhorar o seu desempenho. Como demonstrado nesta dissertação, através da implementação das melhorias sugeridas é possível um aumento de 39% na autossuficiência da instalação o que permite evitar a emissão de 31,9 toneladas de CO₂ para a atmosfera por mês. Caso fosse considerado o impacto energético do novo sobrepessor híbrido, que não chegou a ser instalado, a autossuficiência energética da instalação subiria para 94%, alcançando desta forma um excelente desempenho energético.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação baseou-se na análise da potência e da energia consumida de cinco equipamentos presentes na ETAR do Ave com vista à melhoria da eficiência energética da instalação. Estender o estudo a outros equipamentos, que operam várias horas por dia e/ou

que poderão apresentar alguma ineficiência, será, com certeza, uma forma de alargar o conhecimento acerca das potencialidades de reduzir os consumos energéticos da ETAR.

Para além da potência e do consumo energético, o analisador de rede permitia recolher uma série de variáveis elétricas, cujo seu estudo estava fora do âmbito desta dissertação. No entanto, a sua análise poderá ser útil para averiguar se os equipamentos estão a operar correta e eficientemente.

De modo a obter-se dados mais fidedignos e representativos poder-se-á ampliar, por exemplo, para uma semana, a duração do registo de dados pelo analisador de rede. Outra recomendação seria alargar o período de medições até aos meses de verão o que permitirá abranger a época alta, que ocorre devido à afluência de turistas nos concelhos de Vila do Conde e Póvoa de Varzim. Assim, seria possível efetuar medições nos módulos de lâmpadas UV que somente se encontram em funcionamento entre os meses de junho e setembro, para efetuar a desinfecção do efluente final. Além disso, com a recolha de dados nos principais equipamentos consumidores de energia durante a época estival será possível comparar o seu período de operação e o seu consumo energético com os dados obtidos nesta dissertação referentes à época baixa.

A realização de medições no sobrepessor híbrido, cujo estudo não foi possível no decorrer desta dissertação, devido à sua instalação tardia na ETAR, também seria recomendável para depois ser possível comparar o seu consumo com os sobrepessores de êmbolos rotativos que não foram substituídos.

Por último, seria interessar efetuar medições no parafuso de arquimedes do 1º estágio de elevação após o aumento da frequência do seu motor de modo a averiguar qual seria a redução conseguida do consumo energético.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Bauer, M. Philnrick, and B. Vallario, "The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities," 2014.
- [2] W. Wilson, "Water- Energy Nexus," 2016.
- [3] Y. Gu *et al.*, "The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants," *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 1463–1475, 2017.
- [4] Y. Gu *et al.*, "Quantification of the water , energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water – energy nexus perspective," *Ecol. Indic.*, vol. 60, pp. 402–409, 2016.
- [5] L. Feng and B. Chen, "Energy-water Nexus of Wastewater Treatment System: Conceptual Model and Framework," *Energy Procedia*, vol. 104, pp. 141–145, 2016.
- [6] J. Rojas and T. Zhelev, "Energy efficiency optimisation of wastewater treatment: Study of ATAD," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 38, pp. 52–63, 2012.
- [7] H. Wang *et al.*, "Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa," *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 873–881, Dec. 2016.
- [8] S. Longo *et al.*, "Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement," *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 1251–1268, 2016.
- [9] D. Panepinto, S. Fiore, M. Zappone, G. Genon, and L. Meucci, "Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy," *Appl. Energy*, vol. 161, no. May 2016, pp. 404–411, 2015.
- [10] F. Hernández-Sancho, M. Molinos-Senante, and R. Sala-Garrido, "Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 14, pp. 2693–2699, 2011.
- [11] X. Hao, R. Liu, and X. Huang, "Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China," *Water Res.*, vol. 87, pp. 424–431, 2015.
- [12] G. Mannina *et al.*, "Greenhouse gases from wastewater treatment - A review of modelling tools," *Sci. Total Environ.*, vol. 551–552, pp. 254–270, 2016.
- [13] D. Torregrossa, J. Hansen, F. Hernández-Sancho, A. Cornelissen, G. Schutz, and U. Leopold, "A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants," *Appl. Energy*, vol. 208, no. August, pp. 1430–1440, 2017.

- [14] H. M. Do Monte, M. T. Santos, A. M. Barreiros, and A. Albuquerque, *Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. 2016.
- [15] Electric Power Research Institute, “Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries,” *Water Res. Found.*, pp. 1–194, 2013.
- [16] Agência Portuguesa do Ambiente, “Guia para a Avaliação de Impacte das Estações de Tratamento de Águas Residuais,” 2008.
- [17] F. Spellman, *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*, vol. 155, no. 1. Lewis Publishers, 2003.
- [18] Efavec, “Memória descritiva e justificativa do processo de tratamento e equipamento - ETAR do Ave.”
- [19] EPA, “Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems,” 2004.
- [20] EPA, “Evaluation of Energy Conservation Measures for Wastewater Treatment Facilities,” 2010.
- [21] D. Alexandra, “Análise dos consumos energéticos nas ETAR . Casos de estudo : ETAR do Seixal e Sesimbra .,” 2016.
- [22] J. Daw, K. Hallett, J. DeWolfe, and I. Venner, “Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities,” 2012.
- [23] A. S. Stillwell, D. C. Hoppock, and M. E. Webber, “Energy recovery from wastewater treatment plants in the United States: A case study of the energy-water nexus,” *Sustainability*, vol. 2, no. 4, pp. 945–962, 2010.
- [24] G. Crawford and J. Sandino, “Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: A Compendium of Best Practices and Case Studies of Novel Approaches,” 2010.
- [25] B. K. Gangichetty, “Strategic Process Integration of Energy and Environmental Systems in Wastewater Treatment Plants,” 2010.
- [26] M. Water, M. A. Program, W. Bank, M. Water, M. A. Program, and W. Bank, “Energy Efficiency in Municipal Water and Wastewater Works,” 2014.
- [27] Mohammad Badruzzaman, C. Cherchi, and J. G. Jacangelo, “Water and Wastewater Utility Energy Research Roadmap,” 2015.
- [28] P. Simón Andreu, C. Lardín Mifsut, and M. Abellán Soler, “Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia,” *Ing. Civ.*, no. 168, pp. 93–112, 2012.
- [29] N. Feliciano, “Otimização Energética de Sistemas de Arejamento e Agitação,” 2014.
- [30] M. Barros, “Otimização energética de sistemas de arejamento nas estações de tratamento de águas residuais,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [31] F. M. da S. Godinho, “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.,” Universidade de Lisboa, 2015.
- [32] M. Ali and S. Okabe, “Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in

- process start-up and remaining issues,” *Chemosphere*, vol. 141, pp. 144–153, 2015.
- [33] G. Silvestre, B. Fernández, and A. Bonmatí, “Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 255–262, 2015.
- [34] W. Atkinson, “BREEDING BETTER BUGS: IS TINY BACTERIUM THE NEXT BIG THING IN NITROGEN REMOVAL?” [Online]. Available: <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-29/issue-8/editorial-features/breeding-better-bugs.html>. [Accessed: 22-Mar-2018].
- [35] R. Cano, S. Pérez-Elvira, and F. Fdz-Polanco, “Energy feasibility study of sludge pretreatments : A review,” *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 176–185, 2015.
- [36] J. C. Rodrigo and J. De Castro, “Optimización de la eficiencia energética en una EDAR - El proceso de hidrólisis térmica en continuo EXELYS™.”
- [37] S. Oliveira, “ENSAIO EXPLORATÓRIO DE OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO PRIMÁRIO DA ETAR DE BEIROLAS PARA INCREMENTAR A EFICIÊNCIA ENEGÉTICA - Aplicação de Moringa oleifera no processo de coagulação-floculação,” Universidade de Lisboa, 2014.
- [38] A. Carolina and C. Valverde, “Minimização Do Consumo Energético E Maximização De Valorização Em Etar Municipal,” 2015.
- [39] K. Y. Park, H. M. Jang, M. R. Park, K. Lee, D. Kim, and Y. M. Kim, “Combination of different substrates to improve anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 109, pp. 73–77, 2016.
- [40] A. Mattioli, G. B. Gatti, G. P. Mattuzzi, F. Cecchi, and D. Bolzonella, “Co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste and sludge improves the energy balance of wastewater treatment plants: Rovereto case study,” *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 980–988, 2017.
- [41] K. Chae, I. Kim, X. Ren, and K. Cheon, “Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 101, pp. 681–688, 2015.
- [42] M. G. G. González, A. M. Navarro, J. M. Molina-Martínez, and A. Ruiz-Canales, “Medidas de ahorro y eficiencia energética de carácter innovador en estaciones depuradoras de aguas residuales,” pp. 1–7, 2017.
- [43] C. Bousquet, I. Samora, P. Manso, L. Rossi, P. Heller, and J. Anton, “Assessment of hydropower potential in wastewater systems and application to Switzerland,” *Renew. Energy*, 2017.
- [44] V. Berger, A. Niemann, and T. Frehmann, “Contributions and Solutions Using Small Hydro Power in Advanced Energy Recovery Strategies on WWTPs,” 2013.
- [45] C. Power, P. Coughlan, and A. McNabola, “Microhydropower Energy Recovery at Wastewater-Treatment Plants: Turbine Selection and Optimization,” *J. Energy Eng.*, vol. 143, no. 1, p. 04016036, 2017.
- [46] C. Power, A. McNabola, and P. Coughlan, “Development of an evaluation method for hydropower energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland

- and the UK,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 7, pp. 166–177, 2014.
- [47] S. Puig, M. Serra, M. Coma, M. D. Balaguer, and J. Colprim, “Simultaneous domestic wastewater treatment and renewable energy production using microbial fuel cells (MFCs),” *Water Sci. Technol.*, vol. 64, no. 4, pp. 904–909, 2011.
- [48] L. Peixoto, G. Martins, D. Amorim, P. Parpot, R. Nogueira, and D. Brito, “Células de Combustível Microbianas: Um Processo Inovador para Produção de Energia e Tratamento de Águas Residuais em Sistemas Descentralizados,” *11º Simpósio Hidráulica e Recur. Hídricos dos Países Expressão Port.*, pp. 1–11, 2013.
- [49] K. J. Chae and J. Kang, “Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resources,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 664–672, 2013.
- [50] O. Nowak, P. Enderle, and P. Varbanov, “Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: Lessons learned from Austrian applications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 88, pp. 125–131, 2015.
- [51] D. Day, “Beyond Net Zero,” 2012. [Online]. Available: https://www.tpomag.com/editorial/2012/12/beyond_net_zero. [Accessed: 25-Mar-2018].
- [52] “ETAR da Guia 0% Energia, 100% Autossustentável,” *EPAL*, 2017. [Online]. Available: <http://www.epal.pt/EPAL/menu/legal/noticias/2017/01/24/etar-da-guia-0-energia-100-autossustentavel>. [Accessed: 25-Mar-2018].
- [53] EPAL, “ETAR da Guia,” *Águas livres*, p. 8, 2016.
- [54] Á. do Norte, “ETAR.” [Online]. Available: <http://www.adnorte.pt/pt/comunicacao/galeria/detalhe-galeria-imagens/?id=61&img=114&bl=16>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [55] Efacec, “OMC-CSA-0235 – PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DE OPERAÇÃO E DE MANUTENÇÃO DOS SUBSISTEMAS DE SANEAMENTO DO AVE E VILA DO CONDE SUL.”
- [56] Aerzen, “Compressor de êmbolos rotativos.” [Online]. Available: <https://www.aerzen.com/pt/produto/compressores-de-embolo-rotativo-delta-hybrid/performance/d-152-s.html#performance>. [Accessed: 27-Apr-2018].
- [57] Águas do Ave, “CE_ETAR do Ave - Projecto,” 2008.
- [58] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, 4ª edição. 2003.
- [59] J. M. V. Oliveira e Carmo, “Estratégia de Adaptação das ETAR às Alterações Climáticas com Suporte na Simulação Dinâmica,” Universidade de Lisboa, 2013.
- [60] E. Environmental Business Specialists, “Primary Clarifier Operation.” [Online]. Available: <https://www.ebsbiowizard.com/primary-clarifier-operation-667/>.
- [61] R. Fuller, “Wastewater Clarifier Performance,” 2016. [Online]. Available: <https://www.thewastewaterblog.com/single-post/2016/10/22/Wastewater-Clarifier-Performance>. [Accessed: 22-Jun-2018].
- [62] W. E. Federation, “Primary Treatment,” .

- [63] Valmet, “Valmet Sludge Dewatering Optimizer.” 2017.
- [64] N. Gurieff, S. Højsgaard, B. Nielsen, and J. C. Rodrigo, “Optimización de la eficiencia energética y producción de biogás,” pp. 44–53, 2014.
- [65] Veolia, “Exelys Continuous thermal hydrolysis.”
- [66] H. M. Saraiva, “Otimização do consumo energético em Estações de Tratamento de Águas Residuais - ETAR,” Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2016.
- [67] Pacto de Autarcas para o Clima e Energia, “Factores de emissão,” 2013, pp. 1–4.

ANEXO I: QUADROS ELÉTRICOS

I.1 Quadro elétrico 2

Tabela I - 1: Equipamentos do quadro elétrico 2

Equipamento	Potência Inst.(kW)	Quantidade disponível
Elevação inicial		
Parafuso de Arquimedes	75,00	6
Ventilador		1
Gradagem		
Grade grossa de limpeza mecânica	0,75	2
Tamizador/compactador com tambor rotativo	1,10	2
Tapete transportador	1,10	1
Parafuso transportador horizontal	0,55	1
Comporta motorizada	0,75	3
Desarenamento/desengorduramento		
Ponte raspadora	0,55	2
Arejador submersível (tipo <i>aeroflott</i>)	1,50	12
Electroagitador de eixo vertical	1,10	1
Bomba de gorduras	1,50	2
Triturador de gorduras	1,50	2
Compressor de canal lateral	2,20	4
Classificador de areias	0,25	1
Decantação primária		
Ponte raspadora	0,25	3
Extração de lamas primárias		
Bomba de rotor excêntrico	9,20	3
Triturador	2,20	1
Compressor de ar para comando das válvulas	1,57	1

I.2 Quadro elétrico 3

Tabela I - 2: Equipamentos do quadro elétrico 3

Equipamento	Potência Inst.(kW)	Quantidade disponível
Desodorização		
Ventilador	90,00	2
Bomba centrífuga	30,00	6
Bomba doseadora de H2SO4 78%	0,02	2
Bomba doseadora de H2O2 35%	0,09	2
Bomba doseadora de NaOH 25%	0,09	2
Resistência de aquecimento	1,50	3

I.3 Quadro elétrico 4

Tabela I - 3: Equipamentos do quadro elétrico 4

Equipamento	Potência Inst.(kW)	Quantidade disponível
Seletores		
Agitador submersível	2,50	12
Tanque de pré-desnitrificação		
Agitador submersível	2,40	4
Agitador submersível	1,25	2
Bomba de hélice horizontal	13,00	2
Bomba de hélice horizontal	10,00	2
Tanque de arejamento		
Agitador submersível (" <i>banana blade</i> ")	4,00	6
Produção de ar		
Sobreprensor de êmbolos rotativos	250	4

I.4 Quadro elétrico 5

Tabela I - 4: Equipamentos do quadro elétrico 5

Equipamento	Potência Inst.(kW)	Quantidade disponível
Decantação secundária		
Ponte raspadora	0,55	3
Recirculação de lamas e extração de lamas em excesso		
Bomba centrífuga submersível para recirculação de lamas	35,00	6
Bomba centrífuga submersível	1,50	6

I.5 Quadro elétrico 6

Tabela I - 5: Equipamentos do quadro elétrico 6

Equipamento	Potência Inst. (kW)	Quantidade disponível
Espessamento gravítico das lamas primárias		
Ponte raspadora	0,84	2
Bomba de rotor excêntrico	1,50	3
Espessamento mecânico das lamas biológicas em excesso		
Tambor de espessamento	1,50	2
Floculador dinâmico	0,55	2
Agitador de pás	1,10	2
Unidade automática de preparação de polieletrólito	0,37	1
Armazenamento e elevação de lamas mistas		
Bomba de rotor excêntrico	4,00	3
Agitador submersível ("mixer")	5,50	1
Digestores		
Compressor de ar para comando das válvulas	1,57	
Circuito de aquecimento de lamas		
Bomba centrífuga de eixo horizontal	7,50	3
Circuito de água quente		
Bomba circuladora monobloco	1,10	3
Agitação dos digestores		
Agitador eixo vertical tipo SCABA	3,60	2
Circuito de biogás		
Ventilador de ar	1,5	1
Purificador de biogás	2,2	1
Bomba centrífuga submersível	1,50	1
Eletroventilador helicoidal	1,50	1
Ventilador de painel	1,50	2
Ventilador	1,50	1
Recuperação de energia		
Compressor de canal lateral	4,90	2
Compressor de canal lateral	1,50	1
Ventilador de cobertura	7,50	1
Armazenamento de lamas digeridas		
Agitador submersível	7,50	2
Bomba de rotor excêntrico	7,50	3
Desidratação das lamas		
Centrífuga	45,00	2
Unidade automática de preparação de polieletrólito	1,10	1
Bomba de rotor excêntrico	0,75	3
Elevação e armazenamento de lamas desidratadas		
Bomba de rotor excêntrico de alta pressão	11,00	2
Bomba de rotor excêntrico	0,37	1

Tabela I-5: Equipamentos do quadro elétrico 6 (continuação)

Reutilização do efluente tratado		
Grupo hidropressor	28,00	1
Sistema compacto de desinfecção UV (em linha)		1

I.6 Quadro elétrico 7

Tabela I - 6: Equipamentos do quadro elétrico 7

Equipamento	Potência Inst.(kW)	Quantidade disponível
Microtamisação		
Microtamisador (tipo discos filtrantes) em tanque	1,10	2
Eletrobomba de eixo vertical	1,50	2
Desinfecção por UV		
Módulos de lâmpadas UV com limpeza automática	20,9 KVA	2
Reutilização do efluente tratado		
Bomba centrífuga submersível	1,50	2

ANEXO II: PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS CONSUMIDORES EM ENERGIA

Tabela II - 1: Equipamentos responsáveis por um maior consumo energético na ETAR do Ave

Equipamento	Função	Potência instantânea (kW)	Época normal			Época estival		
			Potência absorvida (kW)	Período funcionamento diário (h)	Consumo energético diário (kWh)	Potência absorvida (kW)	Período funcionamento diário (h)	Consumo energético diário (kWh)
Sobreprensor de êmbolos rotativos	Arejamento	250	240	9	2.143,6	240	17	3.973,1
Ventilador	Desodorização	90	27	24	648,0	27	24	648,0
Parafuso de Arquimedes	Elevação inicial 1º estágio	75	27	18	481,5	27	20	531,7
	Elevação inicial 2º estágio		35	18	624,2	35	20	689,2
Centrífuga	Desidratação de lamas	45	22	6	137,5	22	12	258,8
Bomba centrífuga submersível	Recirculação de lamas	35	12	12	144,0	30	18	540,0
Módulos de lâmpadas UV com limpeza automática	Desinfecção UV	16,72	-	-	-	15,28	24	366,7

ANEXO III: CÁLCULOS INTERMÉDIOS DO PONTO 4.6.1

III.1 Redução do tempo de arejamento

Inicialmente foi necessário converter a concentração de CBO_5 em CQO biodegradável seguindo o rácio presente na equação 3. Sabendo que no mês de abril a concentração média de CBO_5 à saída da decantação primária foi de 192 mg/L foi possível calcular a CQO biodegradável considerando que o valor do rácio era 1,7.

$$\frac{CQO_b}{192} = 1,7 \Leftrightarrow CQO_b = 326,4 \text{ mg/L}$$

Foi efetuado o mesmo procedimento com a concentração de CBO_5 no efluente final que segundo a licença de descarga é 25 mg/L, obtendo-se, portanto, uma concentração de CQO_b igual a 42,5 mg/L.

De seguida, para o cálculo de $P_{X,bio}$ foram utilizados os seguintes dados:

Tabela III - 1: Dados necessários para o cálculo da quantidade de lamas desperdiçada diariamente

Q - caudal de águas residuais à entrada do reator biológico	14.480 m ³ /d
S₀ - concentração de CQO biodegradável à entrada do reator biológico	326,4 mg/L
S - concentração de CQO biodegradável à saída da ETAR	42,5 mg/L
Y - coeficiente de rendimento de síntese	0,6 mg VSS/mg BOD
kd - coeficiente de decaimento endógeno	0,06 g VSS/ g VSS·d
SRT - idade das lamas	17,4 d
fd - fração de biomassa que permanece como restos de células	0,10 g VSS/ g VSS

Por fim, para o cálculo da equação 4 foram utilizados os seguintes dados:

Tabela III - 2: Dados necessários para o cálculo das necessidades reais de oxigênio no tanque de arejamento.

AOTR - necessidades teóricas de oxigênio (=R _o)	2220 kg O ₂ /d
α - Fator de correção da transferência de O ₂	0,6
β - Fator de correção da tensão superficial-salinidade	0,95
STD - temperatura standard	20 °C
T - temperatura da água no reator biológico	17,4 °C
C_{s,20} - Concentração de saturação de oxigênio dissolvido em água limpa, à temperatura de 20°C e 1 atm	9,08 mg/l
C_L - concentração de oxigênio no tanque de arejamento	2,0 mg/L
K - coeficiente de correlação do caudal	0,90
C_{s,T,H} - Concentração média de saturação de oxigênio dissolvido, em água limpa, à temperatura do processo T e à altitude H	10,94

III.2 Produção de lamas químicas

Os dados teóricos utilizados para os cálculos referentes à produção de lamas químicas encontram-se na seguinte tabela.

Tabela III - 317: Dados para o cálculo da produção de lamas químicas

M (P)	30,97 g/mol
M (Fe)	55,85 g/mol
M (FePO ₄)	150,8 g/mol
M (Fe(OH) ₃)	106,8 g/mol

Após o cálculo da quantidade de fósforo a remover quimicamente, através da equação 9, calculou-se o número de moles:

$$N^{\circ} \text{ moles de P a remover} = \frac{\text{Quantidade de P a remover quimicamente}}{\text{Massa molar de P}}$$

$$N^{\circ} \text{ moles de P a remover} = \frac{3,31}{30,97 \times 10^{-3}} \Leftrightarrow N^{\circ} \text{ moles de P a remover} = 107 \text{ mol}$$

Sabendo que as espécies químicas presentes nas lamas são FePO₄ e Fe(OH)₃ e como ambas as reações apresentam uma estequiometria de 1 para 1 o número de moles de FePO₄ e Fe(OH)₃ será igual ao número de moles de fósforo a remover. Por fim, a quantidade de lamas formadas irá corresponder à soma das massas de cada uma das espécies formadas, como indicado na equação 10.

ANEXO IV: RESULTADOS DO ESTUDO DA VALMET

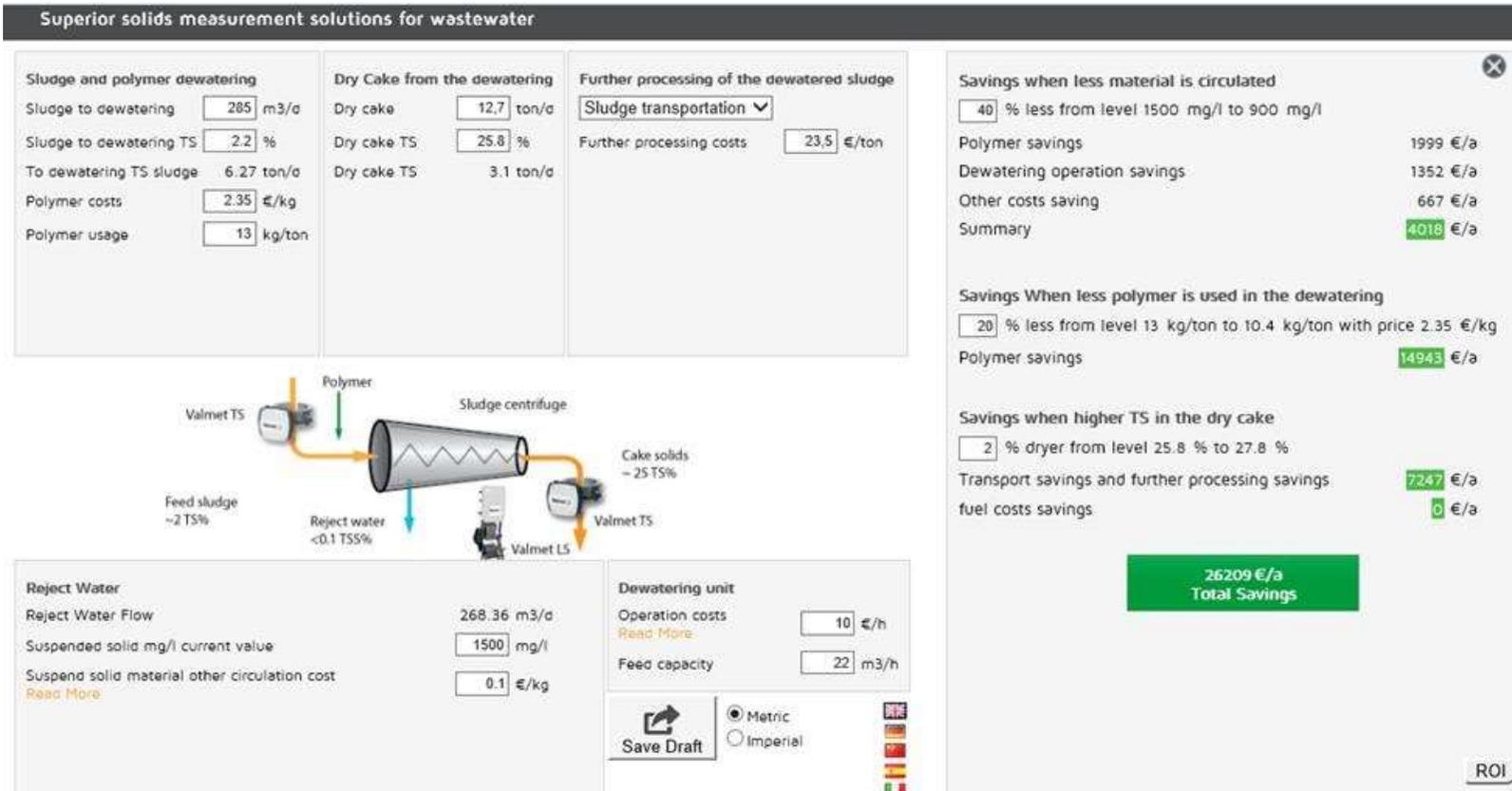


Figura IV - 1: Resultados do estudo da Valmet.

ANEXO V: CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA EXELYS™

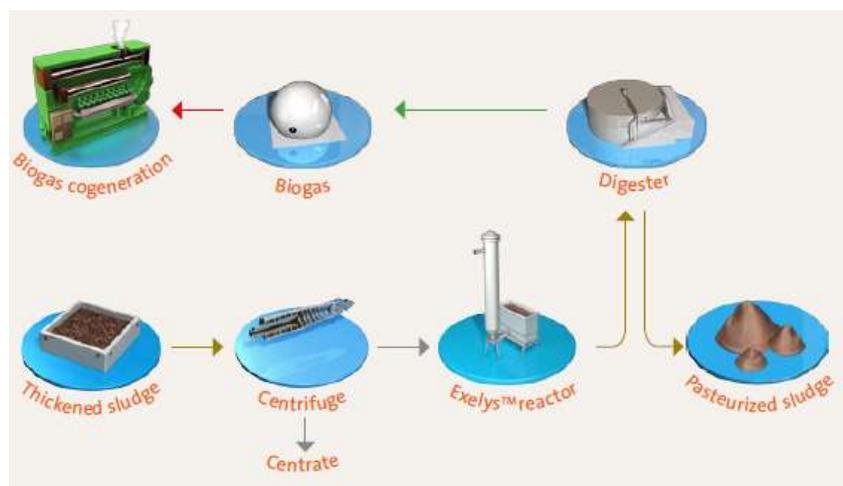


Figura V - 1: Configuração Hidrólise-Digestão.[65]

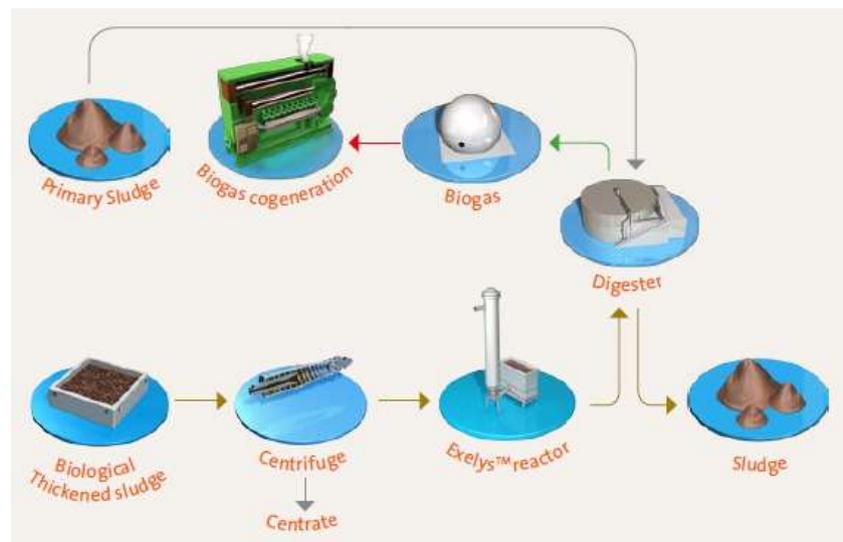


Figura V - 2: Configuração Hidrólise Parcial-Digestão.[65]

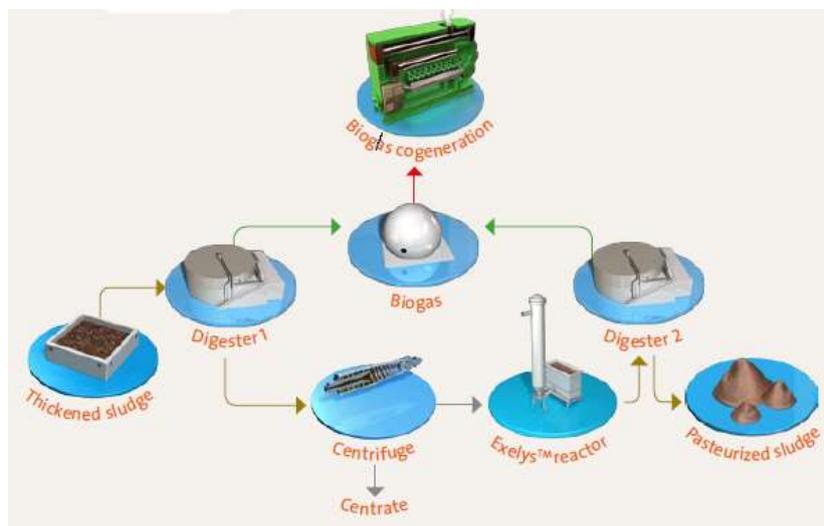


Figura V - 3: Configuração Digestão-Hidrólise-Digestão.[65]