U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

USO EFICIENTE DE ENERGIA E DE REAGENTES NA ETAR DE SOBREIRAS

STEPHANIE FERNANDA DA COSTA ALVARADO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Joaquim Manuel Veloso Poças Martins

Orientadora: Eng.ª Elza Ferraz

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2015/2016

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌍 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,

mas pensar o que ninguém ainda pensou

sobre aquilo que todos conseguem ver

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos direcionam-se a todos aqueles que me apoiaram na realização e concretização desta dissertação e que sempre me prestaram o seu apoio em momentos mais difíceis.

Em especial:

Ao Professor Doutor Joaquim Poças Martins, que orientou o trabalho sempre da melhor forma, com uma postura amigável e, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho. Os meus sinceros agradecimentos pela sua paciência e disponibilidade na elaboração do projeto;

Ao Professor Doutor Vítor Vilar, por ter disponibilizado prontamente o equipamento de respirometria;

À Engenheira Elza Ferraz, que se predispôs a orientar o plano de trabalho, a auxiliar na obtenção dos dados necessários e a esclarecer qualquer dúvida, sempre com boa disposição;

À Engenheira Vânia Morais, que me acompanhou e guiou ao longo de todo o estágio, ajudando-me a compreender o funcionamento da ETAR;

Aos operadores da ETAR de Sobreiras, que me ajudaram a recolher as amostras;

Aos meus amigos e familiares que sempre me acompanharam nos momentos de maior stress, incentivando-me e, constituindo um marco fundamental na pacificidade e na concretização desta dissertação.

RESUMO

Atualmente, as ETAR desempenham um papel fundamental na sociedade, uma vez que permitem mitigar contaminações do meio ambiente, bem como melhorar as condições de saneamento e evitar a propagação de pragas. No entanto, estas instalações caraterizam-se por possuir um elevado consumo energético, associado ao funcionamento dos equipamentos de tratamento, bem como ao sistema de transporte e bombagem de água residual. Por outro lado, sabe-se que o normal funcionamento das ETAR requer a utilização de reagentes na fase de exploração que têm um papel essencial na eficácia do tratamento, sendo importante conhecer a dosagem adequada para evitar desperdícios e custos extras. Deste modo, com o intuito de determinar medidas de otimização dos processos de tratamento que permitam reduzir os gastos energéticos associados e uma melhor gestão dos reagentes utilizados, a ETAR de Sobreiras foi alvo de estudo.

Assim, com base numa auditoria energética efetuada à instalação, procedeu-se à avaliação dos equipamentos que consomem mais energia e, posteriormente, à determinação de diversas medidas que visam a redução dos custos energéticos sem comprometer a qualidade do tratamento dos efluentes. Entre as diversas medidas sugeridas, destacam-se: atualização do Sistema de Gestão de Energia; substituição das atuais bombas de elevação inicial por bombas equipadas com conversor de frequência; montagem de um permutador de calor ar/água na conduta de ar do tanque biológico para aquecimento do edifício administrativo; escalonamento de um único compressor para suprir as necessidades de oxigénio dos dois tanques existentes; operação dos compressores com um sistema de controlo Dual-Point; efetuar a limpeza dos filtros dos compressores com mais frequência e reparar o sistema que os mesmos possuem que avisa quando o filtro está sujo.

De seguida, para efetuar uma análise da eficácia do tratamento biológico (tendo em conta a otimização energética), recorreu-se à técnica de respirometria com o intuito de averiguar se o fornecimento de oxigénio nos tanques biológicos é o mais ajustado face ao oxigénio crítico para as condições operacionais atuais. Desta forma, após realizar o teste OUR de respirometria, verificou-se que a média de oxigénio dissolvido nos tanques é muito superior ao oxigénio crítico determinado (que é, em média, igual a 0,36 mg O_2/L), pelo que o arejamento é excessivo, o que acarreta custos de energia elétrica desnecessários. Posto isto, sugere-se a redução do tempo de funcionamento dos compressores, o que implicaria uma poupança energética elevada, uma vez que estes são o equipamento que consome mais energia na instalação.

Por último, para uma melhor gestão dos reagentes, realizou-se um estudo acerca da quantidade de reagentes utilizada nos processos de tratamento. Deste modo, constatou-se que o consumo específico de polímero é igual a 12,2 kg/ton MS (em média), sendo superior aquele que tinha sido prevista teoricamente, o que conduz a um aumento dos custos. Então, é possível diminuir a quantidade de polímero injetada e obter uma boa sicidade das lamas através da adoção das seguintes medidas: instalação de um caudalímetro à entrada das centrífugas para um maior controlo da dosagem de polímero, bem como de um software que permita o registo desses valores e a sua visualização em tempo real na sala de comando; implementação de um sensor e de um sistema de controlo que possibilita a adaptação da dosagem de polímero utilizada ao teor inconstante de matéria seca nas lamas recebidas.

Em suma, concluiu-se que existem diversas medidas que podem ser adotadas para otimização energética e que permitem a redução dos custos da ETAR de Sobreiras, bem como o aumento da eficácia dos processos de tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: ETAR, Energia, Reagentes, Respirometria, Oxigénio Crítico.

ABSTRACT

Currently, the wastewater treatment plant (WWTP) play a key role in society, as they allow mitigate environmental contamination, improve sanitation and prevent the spread of pests. However, these installations are characterize by having a high energy consumption associated with the operation of the processing equipment as well as the transportation and wastewater pumping system. On the other hand, it is known that normal operation of the WWTP requires the use of reagents in the operational phase which have an essential role in the efficacy of treatment, so it is important to know the proper dosage for waste and avoid extra costs. Thus, in order to determine optimization measures of treatment processes that reduce associated energy costs and better management of reagents used, the WWTP Sobreiras was the subject of study.

Thus, based on an energy audit carried out in the installation, we proceeded to the evaluation of equipment that consume more energy and subsequently the determination of various measures aimed at reducing energy costs without compromising the quality of effluent treatment. Among the various suggested measures include: updating the Energy Management System; replacement of the current initial lift pumps for pumps with frequency converter; assembling a heat exchanger air/water in the air duct of the biological tank for heating the office building; scheduling a single compressor to meet the oxygen requirements of the two existing tanks; operating the compressor with a dual-point control system; cleaning the filters of the compressors more frequently and repair the system that they have that alerts you when the filter is dirty.

Then , to perform an analysis of the effectiveness of biological treatment (taking into account the energy optimization), appealed to the respirometry technique in order to ascertain whether the oxygen supply in the biological tanks is the most set against the critical oxygen to the current operating conditions. Thus, after performing the OUR of respirometry test, it was found that the average dissolved oxygen tanks is far above the critical oxygen (which is, on average, equal to 0.36 mg O_2/L), whereby aeration is excessive, which results in unnecessary electricity costs. Having said that, it is suggested to reduce the operating time of the compressors, which would entail high energy savings, since these are the equipment that consumes more energy installation.

Finally, for better management of reagents, it was made a study on the amount of reagents used in treatment processes. Thus, it was found that the specific consumption of the polymer is equal to 12,2 kg/ton MS (in average), higher than the one that had been predicted theoretically, which leads to increased costs. So, you can decrease the amount of injected polymer and get a good cake dryness of the sludge by adopting the following measures: installation of a flow meter at the entrance of centrifuges for greater control of polymer dosage, as well as software that allows logging these values and its real-time display in the control room; implementing a sensor and a control system which allows adjustment of the polymer dosage used when volatile content of dry matter in the incoming sludge.

In short, it was concluded that there are several measures that can be adopted for energy optimization and allow the reduction of costs of the treatment plant Sobreiras and increasing the effectiveness of the treatment processes.

KEYWORDS: WWTP, Energy, Reagents, Respirometry, Critical Oxygen.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETO, ÂMBITO, OBJETIVOS E BASE BIBLIOGRÁFICA 2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA 2

2. PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS 3
2.1. PRÉ-TRATAMENTO 4
2.2. TRATAMENTO PRIMÁRIO 4
2.3. TRATAMENTO SECUNDÁRIO 5
2.4. TRATAMENTO TERCIÁRIO 5
2.5.TRATAMENTO DE LAMAS 5

3. CARACTERIZAÇÃO DA ETAR DE SOBREIRAS 7
3.1. ASPETOS GERAIS 7
3.2. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES 8
3.3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO 8
3.3.1. LINHA LÍQUIDA 9
3.3.1.1. Pré-Tratamento 9
3.3.1.2. Tratamento Primário 10
3.3.1.3. Tratamento Biológico de Gorduras 11
3.3.1.4. Tratamento Biológico 12
3.3.1.5. Decantação Secundária 13
3.3.1.6. Filtração Terciária em Areia 14
3.3.1.7. Desinfeção UV 14
3.3.2. LINHA DE SÓLIDOS 15
3.3.2.1. Flotação de Lamas 15

3.3.2.2. Bacia de Misturas de Lamas 15
3.3.2.3. Desidratação e Armazenamento de Lamas 15
3.3.3. DESODORIZAÇÃO 16

4. TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 17
4.1. AUDITORIA ENERGÉTICA 18
4.2. CONSUMOS ENERGÉTICOS NA ETAR DE SOBREIRAS 19
4.2.1. PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS CONSUMIDORES DE ENERGIA 19
4.2.2. DESAGREGAÇÃO DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS POR SETOR 22
4.3. MEDIDAS DE REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA 23
4.3.1. SISTEMAS DE GESTÃO DE ENERGIA 24
4.3.2. SISTEMAS DE ELEVAÇÃO INICIAL 24
4.3.3. SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ADMINISTRATIVO 24
4.3.4. TRATAMENTO PRIMÁRIO 25
4.3.5. AREJAMENTO 25
4.3.6. INFILTRAÇÃO, AFLUÊNCIA E VAZAMENTOS 27
4.3.7. ENERGIAS RENOVÁVEIS 27
4.3.8. PRODUÇÃO DE ENERGIA 28
4.3.9. CAMPANHAS DE SENSIBILIZAÇÃO 28

5. RESPIROMETRIA NA OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA 29
5.1. RESPIROMETRIA 29
5.1.1. OXIGÉNIO CRÍTICO 31
5.2. CASO PRÁTICO DA ETAR DE SOBREIRAS 33
5.2.1. MATERIAIS E MÉTODOS 33
5.2.2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL 33
5.2.3. MÉTODOS 34
5.2.3.1. Determinações Analíticas 34
5.2.3.2. Procedimento Experimental 34
5.2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 35

6. GESTÃO DE REAGENTES 39

6.1. CONSUMO ESPECÍFICO DOS REAGENTES UTILIZADOS NA ETAR DE SOBREIRAS 39

7. CONCLUSÃO 47

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Esquema sobre o funcionamento geral de uma ETAR 4
Fig. 2 – ETAR de Sobreiras 7
Fig. 3 – Layout da instalação 8
Fig. 4 – Esquema geral dos diversos processos de tratamento aplicados na ETAR de Sobreiras 9
Fig. 5 – Vista geral do processo de gradagem 10
Fig. 6– Vista parcial dos tanques de desarenamento e do classificador de areias 10
Fig. 7 – Vista parcial do processo de desengorduramento 11
Fig. 8 – Vista parcial da decantação lamelar acelerada 11
Fig. 9 – Vista parcial dos reatores biológicos 12
Fig. 10 – Esquema do tratamento biológico da ETAR de Sobreiras 13
Fig. 11 – Vista parcial dos decantadores secundários 13
Fig. 12 – Vista parcial do sistema de desinfeção UV 14
Fig. 13 – Vista parcial do flotador de lamas 15
Fig. 14 – Vista parcial das centrífugas de desidratação de lamas 15
Fig. 15 – Vista parcial das torres de lavagem 16
Fig. 16 – Energia consumida numa ETAR de grandes dimensões 17
Fig. 17 – Repartição sectorial de consumos elétricos 22
Fig. 18 – Qualidade vs energia 23
Fig. 19 – Curvas de desempenho para compressor do tipo S 26
Fig. 20 – Representação esquemática da relação entre a transferência de oxigénio, a respiração, o consumo de substrato e o crescimento da biomassa 30
Fig. 21 – Principais pontos de controlo do processo de lamas ativadas 31
Fig. 22 – Representação esquemática da determinação da concentração de oxigénio crítico 32
Fig. 23 – Respirómetro BM-Advance SURCIS S.L. 34
Fig. 24 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 1) 35
Fig. 25 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 2) 36
Fig. 26 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 3) 36
Fig. 27 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 4) 36
Fig. 28 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 5) 37
Fig. 29 – Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 6) 37

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Caraterísticas típicas de uma água residual doméstica bruta 3
Quadro 2 – Principais dados de base do projeto da ETAR até 2040 8
Quadro 3 – Caraterísticas previstas do efluente final 14
Quadro 4 – Montantes globais de consumo de energia em 2013 19
Quadro 5 – Nº de horas de funcionamento e potência estipulada dos principais equipamentos.....21
Quadro 6 – Oportunidades de melhoria de eficiência em um sistema de ar comprimido genérico 25
Quadro 7 – Variação do consumo com a temperatura de aspiração 26
Quadro 8 – Tecnologias promissoras para produção de energia em ETAR 28
Quadro 9 – Valores de referência da taxa de consumo específico de oxigénio (SOUR).....32
Quadro 10 – Comparação do oxigénio crítico (obtido através dos ensaios de respirometria) com o oxigénio dissolvido nos tanques biológicos da ETAR de Sobreiras 37
Quadro 11 – Reagentes utilizados na ETAR de Sobreiras.....39
Quadro 12 – Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Janeiro de 2016) 40
Quadro 13 – Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Fevereiro de 2016).....41
Quadro 14 – Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Março de 2016).....42
Quadro 15 – Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Abril de 2016).....43
Quadro 16 – Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Maio de 2016) 44
Quadro 17 – Medidas de racionalização dos consumos energéticos da ETAR de Sobreiras 47

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A/M- Razão alimento/microrganismos

CBO- Carência Bioquímica de Oxigénio

CBO_5- Carência Bioquímica de Oxigénio ao fim de 5 dias

CQO- Carência Química de Oxigénio

ETAR- Estação de Tratamento de Águas Residuais

NTK- Azoto Total de Kjeldahl

MS- Matéria Seca

OD- Oxigénio Dissolvido

OUR- Oxygen Uptake Rate

SOUR- Specific Oxygen Uptake Rate

SS- Sólidos Suspensos

SST- Sólidos Suspensos Totais

SSV- Sólidos Suspensos Voláteis

TEP- Tonelada Equivalente de Petróleo

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Em meados do século XIX, com o aumento exponencial da população, com a alteração da estrutura dos ecossistemas e com a evolução da medicina, surgiu a perceção da relação entre a poluição, qualidade da água, condições sanitárias e propagação de surtos infeto-contagiosos. Deste modo, nesta época, em Portugal começou a ter-se em conta o uso sustentável da água, assim como a adoção de medidas legais e de construção de infraestruturas capazes de melhorar a qualidade de água para consumo [1].

De facto, as descargas de águas residuais não tratadas provocam efeitos nefastos quer a nível do ambiente, quer a nível da saúde pública. Com o intuito de mitigar estas consequências, recorre-se à implementação de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), a qual, através de diversos processos físicos, químicos e biológicos, trata esses efluentes. Estas desempenham um papel fundamental na preservação do meio ambiente, contribuindo para a despoluição dos recursos hídricos, assim como para a melhoria dos ecossistemas naturais e da qualidade de vida das populações.

Atualmente, os processos e operações unitárias adotados numa ETAR dependem de diversos fatores, como, por exemplo, do tipo de substâncias presentes nas águas residuais e da sua concentração, bem como da capacidade do meio recetor diluir e assimilar essas substâncias presentes nas águas residuais descarregadas pela ETAR depois do tratamento [2]. Devido à flutuação de caudal e das caraterísticas do afluente que chega às instalações, é efetuado o controlo de diversos parâmetros de funcionamento de maneira a adaptar os processos às várias condições de operação. No entanto, em geral, os processos exigem um elevado consumo de energia elétrica para arejamento, equipamentos eletromecânicos, sistema de controlo, análises frequentes e monitorização praticamente contínua do seu comportamento [3].

Posto isto, verifica-se que as ETAR podem utilizar maiores ou menores quantidades de energia, dependendo, principalmente, do tipo de processos a que recorrem, do tipo de carga dos poluentes, da eficácia do equipamento, das medidas de gestão de energia aplicadas e, ainda, das variações climáticas. Em média, as estações de tratamento de águas residuais que possuem um valor de CBO elevado consomem mais energia, uma vez que, no processo biológico, os microrganismos requerem maiores quantidades de oxigénio para degradar a matéria orgânica [4].

Note-se que estudos efetuados demonstram que cerca de 1 a 4% de toda a energia consumida à escala global localiza-se na indústria do tratamento da água residual [5]. Por sua vez, os processos de tratamento por lamas ativadas requerem o fornecimento de mais de 50% da energia total da instalação [6]. Assim, torna-se fulcral realizar estudos de eficiência energética que permitam reduzir os consumos energéticos e os gastos associados, através da otimização dos processos pela aplicação de tecnologias

emergentes adequadas às unidades de tratamento instaladas, sem comprometer a qualidade do efluente final [7].

Por outro lado, sabe-se que o normal funcionamento das ETAR requer a utilização de reagentes na fase de exploração, sendo fundamental efetuar uma gestão dos reagentes com o objetivo de determinar as necessidades de reagentes para obter um tratamento eficiente e para reduzir os custos relacionados ao seu consumo [8].

1.2. Objeto, Âmbito, Objetivos e Base Bibliográfica

A presente dissertação, intitulada de "Uso Eficiente de Energia e de Reagentes em ETAR de Sobreiras", incide na análise dos maiores consumidores de energia da instalação e na determinação de medidas que permitam a redução desses gastos energéticos. Posto isto, sabendo que o sistema de arejamento é um dos setores que requer mais energia numa ETAR, é também efetuado um estudo de respirometria com o intuito de aumentar a eficácia do tratamento biológico e reduzir o consumo de energia, através da determinação do oxigénio crítico (uma vez que assim é possível conhecer a quantidade ideal de O_2 que deve ser fornecida aos tanques de arejamento, evitando o fornecimento excessivo de O_2 e, consequentemente, gastos de energia desnecessários). Para além disso, este trabalho abrange o estudo da gestão dos principais reagentes utilizados, com o objetivo de comparar os valores teóricos de consumo de reagentes com os que na realidade se verificam diariamente na instalação.

Para a realização deste estudo, procedeu-se à recolha de informação, essencialmente, de teses de mestrado e doutoramento, bem como de livros e artigos (internacionais).

1.3. Organização e Estrutura

Esta dissertação é composta por 7 capítulos, estruturados com os objetivos propostos.

O capítulo 1 o presente, foca-se na apresentação geral da dissertação e no objetivo do trabalho, salientando a importância das ETAR na sociedade atual.

O capítulo 2 descreve, de forma geral, os processos típicos de tratamento existentes nas ETAR.

O capítulo 3 relata o funcionamento da ETAR de Sobreiras, abordando as linhas de tratamento e as principais caraterísticas da instalação.

O capítulo 4 relaciona o tratamento das águas residuais com a eficiência energética. Deste modo, sabendo quais são os equipamentos que consomem mais energia na ETAR em estudo, são sugeridas diversas medidas que permitem reduzir esses gastos energéticos.

O capítulo 5 foca-se na utilização da técnica de respirometria para obtenção do oxigénio crítico, como forma de otimização energética da ETAR de Sobreiras. Assim, neste ponto é descrita a metodologia adotada, os resultados obtidos nos testes OUR realizados e a discussão desses valores.

O capítulo 6 é direcionado para a gestão dos reagentes da ETAR. Neste ponto é então determinado o consumo específico dos reagentes e efetuada a sua comparação com os valores teóricos do dimensionamento. Então, visa verificar se a dosagem dos mesmos está a ser a mais adequada e se não estão a ocorrer desperdícios.

O capítulo 7 detalha as conclusões tiradas ao longo de toda a dissertação.

2

PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Com o desenvolvimento populacional mundial tem vindo a surgir a necessidade de gerir de forma mais eficaz o tratamento dos resíduos sólidos, emissões gasosas e efluentes produzidos pelo Homem, antes destes serem reintroduzidos na Natureza. Desta forma é possível evitar efeitos nefastos no meio ambiente e atingir um desenvolvimento sustentável da civilização humana [9].

Uma água residual constitui um resíduo fluído que é desprezado devido à degradação da sua qualidade após utilização para fins domésticos, industriais, agrícolas e serviços públicos (como a rega e limpezas urbanas), podendo ou não ter o acréscimo de águas pluviais ou outras infiltrações [10]. Geralmente, carateriza-se por possuir um elevado nível de matéria orgânica, assim como de patogénicos, nutrientes e sólidos, emanando odores e gases devido à decomposição da matéria orgânica [11]. As concentrações típicas dos parâmetros de referência de uma água residual doméstica bruta estão apresentadas na tabela seguinte (quadro 1):

Quadro 1- Características típicas de uma água residual doméstica bruta (Fonte: [12]).

	Concentração (mg/L)		
Parâmetro	Forte	Média	Fraca
CBO_5	400	220	110
CQO	1000	500	250
N-Orgânico	35	15	8
$N\text{-}NH_3$	50	25	12
N-total	85	40	20
P-total	15	8	4
Sólidos totais	1200	720	350
Sólidos suspensos	350	220	100

De facto, com as caraterísticas supramencionadas, o tratamento da água residual é essencial para permitir a proteção do ambiente, da saúde pública e de interesses económicos e sociais [9]. Posto isto, procede-se ao encaminhamento das águas residuais para uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR), com o propósito de: reduzir a carga orgânica bem como os nutrientes (azoto e fósforo); remover ou desativar os microrganismos patogénicos e parasitas; e condicionar os subprodutos de tratamento para o seu destino final.

Uma ETAR é caraterizada por possuir diversas operações e processos de tratamento, englobando reações químicas, físicas ou biológicas, que permitem atingir os vários níveis de tratamento necessários para obter um efluente final de qualidade a partir de um afluente cujos parâmetros gerais são conhecidos [13]. O tipo de processo utilizado depende da natureza e características da água residual, dos objetivos de qualidade da água a tratar, do meio recetor e da diluição disponível [12].

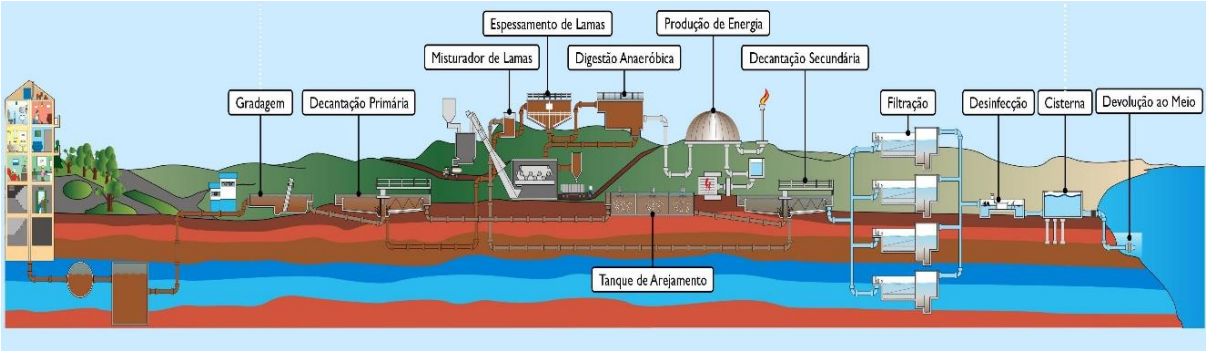


Figura 1-Esquema sobre o funcionamento geral de uma ETAR (Fonte: [14]).

No Decreto-Lei nº. 152/97, de 19 de Junho, com as alterações redigidas pelo Decreto-Lei nº 348/98, de 9 de Novembro, são definidas normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade da água em função dos seus principais usos, sendo apresentados os requisitos legais para os parâmetros de descarga no meio recetor para as águas residuais urbanas.

Tal como referido anteriormente, as linhas de tratamento de águas residuais convencionais consistem numa combinação de processos físicos, químicos e biológicos, podendo dividir-se em cinco processos distintos: pré-tratamento; tratamento primário; tratamento secundário; tratamento terciário; e o tratamento de lamas. De seguida, é apresentada uma breve descrição das caraterísticas de cada etapa.

2.1. PRÉ-TRATAMENTO

Numa primeira etapa, as águas residuais, produzidas pela população através do uso doméstico ou pelas indústrias, chegam à ETAR, onde são gradados e separados os resíduos de maior dimensão. De facto, o tratamento preliminar constitui um processo físico que se divide em duas fases principais: gradagem e desarenamento/desengorduração. A gradagem visa a remoção de materiais sólidos de maiores dimensões que sejam suscetíveis de provocar problemas na operação e manutenção dos diversos equipamentos da ETAR, como, por exemplo, danificação ou obstrução de bombas, válvulas, filtros, tubagens, entre outros. Por sua vez, o desarenamento e desengorduração consistem na separação (através da sedimentação) das areias e partículas mais grosseiras, bem como na remoção das gorduras presentes [15].

2.2. TRATAMENTO PRIMÁRIO

De seguida, nesta etapa são removidos, por ação da gravidade, os sólidos suspensos (correspondentes a cerca de 60% de SST e de 35% de CBO_5), através de processos físicos ou físico-químicos. De maneira a aumentar a eficiência da sedimentação natural no decantador, pode ser efetuada também uma etapa de coagulação/floculação, que consiste em retirar do efluente os constituintes em suspensão que dificilmente iriam ser degradados no tratamento secundário [16].

2.3. TRATAMENTO SECUNDÁRIO

Nesta fase é aplicado um tratamento biológico no qual diversos microrganismos, em condições controladas, degradam sólidos orgânicos e inorgânicos residuais presentes no efluente proveniente do tratamento primário (cerca de 25-50% de CQO e de 50-80% de CBO_5 e de SST). A seguir, o efluente é encaminhado para a Decantação Secundária, possibilitando o depósito das lamas [17].

Tipicamente, nesta etapa o processo mais aplicado é o de lamas ativadas, o qual se carateriza pela realização de um arejamento (normalmente com duração de seis a oito horas) que exige o fornecimento ao sistema de 0,7 a 2 kWh de energia por cada kg de CQO removido [18].

2.4. TRATAMENTO TERCIÁRIO

Neste tratamento, também denominado de tratamento avançado ou tratamento de afinação, são efetuadas operações físicas, bem como processos biológicos e químicos, com o propósito de atingir as concentrações estabelecidas na legislação atual para posterior descarga do efluente. Para esse efeito, procede-se à remoção de quantidades residuais de substâncias suspensas e dissolvidas que permanecem presentes na água depois de ter sido efetuado o tratamento secundário [17].

Na maioria dos casos, o tratamento terciário destina-se à remoção de nutrientes (compostos de azoto e de fósforo), com o intuito de impedir a eutrofização do meio recetor, visto que estes promovem um crescimento rápido e exagerado das espécies vegetais aquáticas, com consequente diminuição da concentração de oxigénio dissolvido na água e morte de peixes e outros seres vivos. O tratamento terciário pode também visar a redução de microrganismos patogénicos (desinfeção), metais pesados, substâncias orgânicas (nomeadamente compostos orgânicos sintéticos) e inorgânicas (como sais) dissolvidas [19].

Após passar por este tratamento, a água pode ser usada na agricultura, na rega de campos de golfe, na rega de espaços verdes, na lavagem de pavimentos e ruas, entre outras utilizações possíveis [14].

2.5. TRATAMENTO DE LAMAS

Esta etapa de tratamento da fase sólida tem como intuito baixar o conteúdo em água das lamas, estabilizar a sua matéria orgânica (para impedir a formação de maus odores), reduzir o número de microrganismos patogénicos e a massa global de sólidos. Para esse efeito, recorre-se à digestão anaeróbia (para degradar a matéria orgânica na ausência de oxigénio), bem como ao espessamento e desidratação (para remover parte da humidade das lamas e assim reduzir o volume e custos inerentes ao transporte e colocação em destino final). Este processo pode ser realizado através de dispositivos de filtração, compressão e separação centrífuga [20].

3
CARATERIZAÇÃO DA ETAR DE SOBREIRAS

3.1. ASPETOS GERAIS

A Estação de Tratamento de Águas Residuais de Sobreiras (ETAR de Sobreiras) é uma instalação de tratamento de águas residuais domésticas pertencente à Empresa Municipal Águas do Porto. Esta é uma empresa municipal cujo capital social é detido na sua totalidade pelo Município do Porto e é responsável pela gestão completa e eficaz do ciclo urbano da água, criando valor económico e social, assim como desenvolvendo boas práticas ambientais. As suas principais áreas de intervenção são: a distribuição de água; a drenagem de águas residuais domésticas; a drenagem de águas pluviais; as praias; e as ribeiras. Por sua vez, o sistema público de drenagem encontra-se organizado em quatro zonas (Norte, Sul, Este e Oeste) apoiadas nas Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) do Freixo e de Sobreiras.

A Estação de Tratamento de Águas Residuais de Sobreiras foi inaugurada em Fevereiro de 2003 (representando um investimento de cerca de 33,6 milhões de euros) e localiza-se nas proximidades da Foz, junto ao estuário do rio Douro [21]. Esta foi dimensionada para tratar os efluentes de uma população equivalente de 200.000 habitantes, sendo que, em média, chegam diariamente à instalação 25 mil metros cúbicos de afluentes, conduzidos por três emissários [22]. Em 2040, prevê-se que esse caudal possa aumentar até aos 54 mil metros cúbico. Note-se que a estrutura serve a zona ocidental da cidade, desde Miragaia ao Castelo do Queijo e à Circunvalação, até à Areosa, numa área que inclui os Hospitais de Santo António e São João [21].

Figura 2- ETAR de Sobreiras (Fonte: *[23]*).

A ETAR situa-se numa zona residencial e ocupa uma área classificada com interesses ambientais e patrimoniais, de paisagem voltada para o rio e observável de muitos pontos das cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia [22]. Com o intuito de minimizar o impacto visual das construções e tendo em conta a exiguidade do terreno disponível, a ETAR desenvolve-se em vários níveis e encontra-se parcialmente

enterrada. Para além disso, as coberturas dos principais órgãos de tratamento são vegetalizadas e a zona envolvente ajardinada [21].

Esta instalação recorre a técnicas de última geração que asseguram vários níveis de flexibilidades às variações de carga e caudal, e de qualidades de água tratada [22]. A seguinte tabela apresenta os dados de base para projeto da ETAR (quadro 2):

Quadro 2- Principais dados de base do projeto da ETAR até 2040 (Fonte: [25]).

Condições de Afluência	2000	2020	2040
População Atendida (hab)	200 000	200 000	200 000
Capitação (L/hab.d)	200	230	270
Caudal de dimensionamento processual (m^3/d)	40 000	46 000	54 000
Caudal de dimensionamento hidráulico ponta (m^3/h)	3449	3848	4342
CBO_5 (mg O_2/L)	309	309	309
CQO (mg O_2/L)	626	626	626
SST (mg/L)	400	400	400
N-total (mg N/L)	71	71	71
P-total (mg P/L)	14	14	14
Coliformes Fecais (N/100mL)	$1x10^7$	$1x10^7$	$1x10^7$
Óleos e gorduras (mg/L)	100	100	100

3.2. Descrição das Instalações

A ETAR de Sobreiras divide-se em três blocos (A, B e C) e edifício administrativo, distribuídos entre a cota 1,45 m e a cota 25,3 m. O edifício administrativo é um espaço de apoio à exploração/organização da instalação, existindo neste gabinetes, laboratórios, vestiários, salas de reuniões, salas de supervisão e auditórios. No que diz respeito ao bloco A, este é composto pelos tanques biológicos e pelos tanques de decantação secundária. Por sua vez, no bloco B encontram-se instalados os filtros de areia, a sala de compressores, os SEDIPAC's, Biomasters, o tratamento terciário e a flotação. Relativamente ao bloco C, este alberga a obra de entrada e gradagem, a elevação inicial, o classificador de areias, a desidratação de lamas, os silos de lamas e a desodorização.

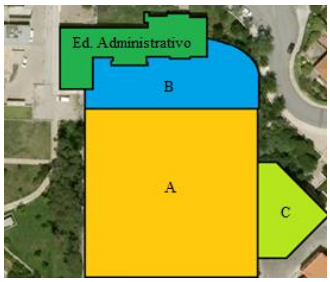


Figura 3- Layout da instalação (Fonte: [27]).

3.3. Descrição do Sistema de Tratamento

A linha de tratamento da ETAR é constituída por tamisagem, elevação, desarenamento/ desengorduramento e decantação primária lamelar (SEDIPAC 3D), biofiltração (BIOMASTER), nitrificação/desnitrificação em culturas livres, filtração (AQUAZUR V), desinfeção por U.V., flotação de lamas biológicas em excesso, mistura e homogeneização com lamas primárias, desidratação em

centrífugas, estabilização química com cal e armazenamento em silos [22]. Existe também uma linha de desodorização, que é efetuada por lavagem química em três estágios [22].

O fluxograma geral do tratamento de águas residuais, lamas e gases encontra-se esquematizado na figura seguinte (figura 4):

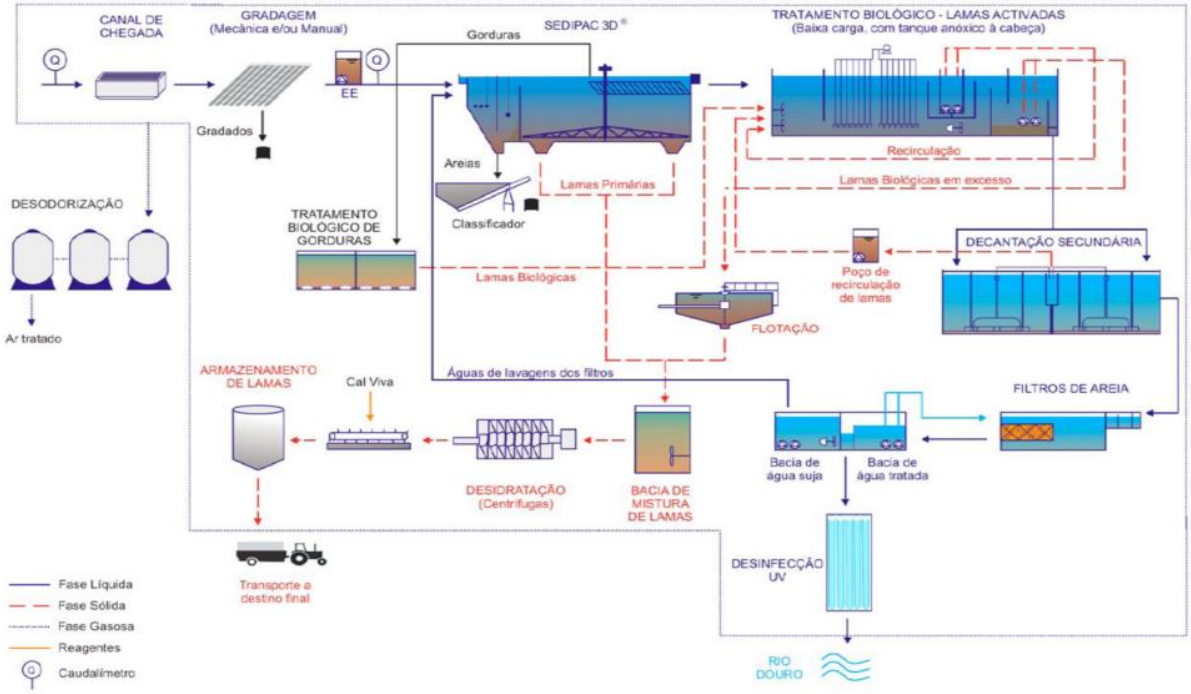


Figura 4- Esquema geral dos diversos processos de tratamento aplicados na ETAR de Sobreiras (Fonte: *[24]*)

De seguida é apresentada uma descrição mais detalhada de cada etapa do tratamento.

3.3.1. LINHA LÍQUIDA

Esta linha engloba o pré-tratamento, o tratamento primário, o tratamento biológico/secundário e o tratamento terciário.

3.3.1.1. Pré-tratamento [25]

O tratamento de águas residuais domésticas começa ao nível da cota 9,30 m do edifício da instalação. O afluente rececionada na ETAR através de três coletores situados ao nível da cota 2,80 m (Foz, Douro e Norte) é encaminhados para uma obra de chegada comum, o poço de entrada, onde é monitorizado o caudal. Na obra de chegada situa-se ainda a ligação ao by-pass geral. De seguida, o efluente sofre uma gradagem primária, com vista à remoção dos detritos mais grosseiros, para, dessa forma, proteger os equipamentos da estação de tratamento e as lamelas dos decantadores primários, as quais poderiam sofrer entupimentos altamente prejudiciais ao seu funcionamento. Por fim, os gradados são encaminhados por dois parafusos transportadores até aos contentores situados na cota 4,80 m.

Figura 5- Vista geral do processo de gradagem (Fonte: *[24]*).

O efluente proveniente da gradagem dá entrada num poço de bombagem, donde é elevado até à cota 23,40 m, em direção ao tratamento primário. Este poço de bombagem recebe também os filtrados da centrifugação e as águas do classificador de areias. Os filtrados da centrifugação são encaminhados para o poço de entrada e as águas da lavagem de filtros em areia são encaminhados diretamente para o canal de repartição de caudal dos Sedipac's.

3.3.1.2. Tratamento Primário [25]

Após a gradagem, o efluente é submetido ao triplo tratamento de remoção de areias, remoção de óleos e decantação primária. Esta remoção é realizada em três equipamentos designados por "SEDIPAC".

a) Desarenamento

Na etapa de remoção de areias, o efluente é repartido por três linhas equipadas com rampas de difusão de ar comprimido, assegurando a separação das areias da matéria orgânica que as envolve. O fornecimento de ar aos difusores é assegurado por um conjunto de três compressores (um por cada SEDIPAC). Cada SEDIPAC está equipado com uma fossa de extração de areias, permitindo uma maior facilidade de extração. Nestas fossas, a areia é recolhida para um coletor comum e enviada para um classificador de areias situado no edifício da obra de entrada (corpo C), o qual garante a separação dos componentes minerais. A areia separada no fundo do aparelho é transportada através de um parafuso transportador em direção a um contentor adequado.

Figura 6- Vista parcial dos tanques de desarenamento e do classificador de areias (Fonte: *[24]*).

b) Desengorduramento

Esta operação de remoção de gorduras desenrola-se em quatro cubas por Sedipac, as quais são atravessadas pelo efluente em fluxo ascendente. A conjugação de duas correntes ascendentes (ar e água) permite uma maior facilidade de "aprisionamento" das gorduras pelas bolhas de ar, favorecendo a flotação. Uma vez chegadas à superfície, as gorduras flotadas são conduzidas, pela corrente criada, para uma caleira pivotante de recolha motorizada, a qual as encaminha para um poço. Daqui as gorduras são enviadas por gravidade para o tratamento biológico das gorduras (referido em separado).

Figura 7- Vista parcial do processo de desengorduramento (Fonte: *[24]*).

c) Decantação lamelar acelerada

Após o desengorduramento, o efluente é encaminhado para a decantação primária. As partículas em suspensão entram no decantador através de uma larga zona de alimentação, a qual para além de abrandar a velocidade de circulação, evita a criação de remoinhos, pela variação do caudal, assegurando assim, nesta zona, a decantação da maior parte das matérias em suspensão. As lamas decantadas são raspadas por intermédio da ponte raspadora de fundo para quatro fossas situadas junto aos cantos da zona de decantação.

Para eliminar os flocos residuais que não tenham decantado, existem ainda módulos lamelares localizados na parte superior do decantador. Assim, os flóculos depositam-se nas paredes inferiores dos módulos. Aqui vão-se acumulando até formar pequenos depósitos com um peso suficiente que permite o seu deslizamento em direção ao leito de lamas no fundo do decantador.

Figura 8- Vista parceal da decantação lamelar acelerada (Fonte: *[24]*).

O efluente depurado é recolhido por transbordo sobre caleiras na parte superior e é enviado em direção ao sistema secundário. Por outro lado, as lamas vão-se acumulando na parte inferior do decantador, sendo necessário remover estas periodicamente. Para esse efeito, existem válvulas automáticas de extração de lamas em excesso para cada Sedipac. Estas válvulas irão isolar a saída de lamas em direção a uma bomba de extração, a qual, por sua vez, irá elevar estas para a Bacia de Mistura de Lamas.

3.3.1.3. Tratamento Biológico de Gorduras [25]

O tratamento das gorduras é realizado em dois reatores biológicos aeróbios (Biomaster), que são fortemente arejados com ar insuflado através de uma rede de difusores. As gorduras recolhidas na zona do desengorduramento dos Sedipacs são enviadas para uma caixa de entrada. Dessa caixa, as gorduras passam por descarga superficial para os reatores biológicos, onde entram em contato com a biomassa depuradora. Esta biomassa é particularmente adaptada à degradação de gorduras (substrato carbonado), transformando-as em água e anidrido carbónico.

O recurso a tempos de retenção no interior dos reatores da ordem das três semanas permite um tratamento eficaz das gorduras, uma vez que o reator desenvolve, por si próprio, as bactérias especificas necessárias a este tratamento. É, contudo, necessário adicionar nutrientes (azoto e fósforo) para garantir o adequado equilíbrio do meio.

As reações de degradação das gorduras são acompanhadas pela formação de lamas biológicas, as quais são removidas periodicamente em direção aos Tanques de Arejamento. Com o objetivo de manter a concentração das lamas próxima dos 15 g/L, adiciona-se periodicamente água de diluição.

3.3.1.4. Tratamento Biológico [25]

A depuração biológica é realizada em dois "Reatores de Biomassa Dispersa". Esta etapa tem por objetivo a eliminação das contaminações carbonáceas, azotadas e fosfatadas e, a retenção de coloides existentes na matéria em suspensão, sob as três formas anteriores.

Para esse efeito, à saída dos decantadores primários, os efluentes dirigem-se por gravidade para cada uma das duas linhas de tratamento. Para cada linha de tratamento, existem dois reatores em série: o primeiro em condição anóxica e o segundo em condição aeróbia.

Figura 9- Vista parcial dos reatores biológicos (Fonte: [24]).

a) Zona Anóxica

A agitação na zona anóxica é assegurada por três agitadores submersíveis. A zona anóxica recebe, a montante, as várias recirculações, nomeadamente a recirculação de nitratos do reator aeróbio e a recirculação de lamas da decantação secundária.

Para assegurar uma desnitrificação correta na zona anóxica, é necessário dispor de um potencial suficiente de carbono (expresso em CBO_5) e de uma concentração suficiente em nitratos. Para esse efeito é efetuada a recirculação do licor misto (mistura de efluente e de biomassa) para a zona anóxica através de uma bomba aceleradora (figura 10).

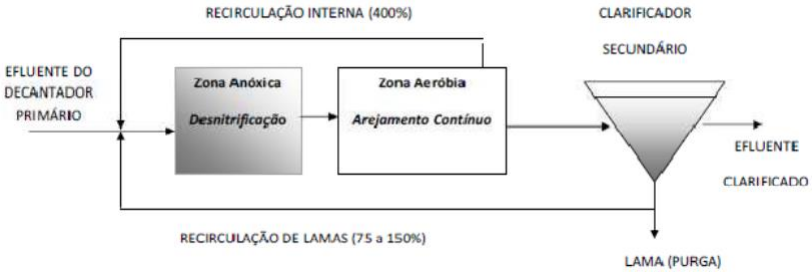


Figura 10- Esquema do tratamento biológico da ETAR de Sobreiras (Fonte: *[24]*).

Salienta-se também que, neste caso, a CBO_5 arrastada pelas águas residuais não é suficiente para o desenvolvimento da flora bacteriana, pelo que se torna necessário a adição de uma fonte externa de carbono. Neste caso, utiliza-se uma solução açucarada (melaço), cujas quantidades são aferidas por ensaios experimentais aquando da sua utilização, em função da composição da solução e do rendimento da reação de desnitrificação.

b) Zona aeróbia/Zona endógena

O oxigénio é fornecido à zona aeróbia através de uma tubagem geral de alimentação - uma por linha de tratamento -proveniente de três compressores (blowers), um dos quais de reserva. A partir desta tubagem o ar é injetado nos tanques através de um sistema de rampas difusoras, instaladas no fundo dos tanques.

Para regular o automatismo da oxigenação existem os seguintes aparelhos de medida: analisador de oxigénio, analisador de redox, analisador de SST e analisador de nitratos. Para evitar as sedimentações quando não há arejamento na zona endógena, existe um agitador submersível. O fornecimento de ar às rampas de arejamento é assegurado por dois compressores centrífugos multicelurares.

Nas zonas endógenas, a insuflação de ar é intermitente e temporizada, sendo que, durante as paragens, estas zonas funcionam momentaneamente como zonas anóxicas, permitindo terminar a destruição dos nitratos.

3.3.1.5. Decantação Secundária [25]

O efluente antes de entrar nos Decantadores Secundários, passa através de duas Câmaras de Desgasificação (cada uma associada a uma bacia de arejamento). Destas câmaras o efluente é encaminhado graviticamente em direção aos decantadores, os quais estão instalados no piso inferior.
Os quatro decantadores secundários são do tipo retangular (com fundo sem inclinação longitudinal) e estão equipados com pontes raspadoras individuais, para a extração rápida das lamas sedimentadas. Para além disso, possuem uma pá raspadora de superfície que permite remover a camada de sobrenadante que se forma à superfície.

Figura 11- Vista parcial dos decantadores secundários (Fonte: *[24]*).

Os efluentes clarificados são recolhidos na parte superior dos decantadores através de um conjunto de tubos perfurados e são enviados por gravidade para os filtros de areias. Por outro lado, as lamas extraídas são encaminhadas para uma caleira central em cada decantador, e desta são encaminhadas para dois poços de recirculação de lamas. Dai são recirculadas para os tanques biológicos, de forma a garantir uma concentração constante de lamas.

Importa referir que para prevenir o aparecimento de bactérias filamentosas é doseada ocasionalmente uma solução de hipoclorito de sódio nas duas tubagens de recirculação de lamas, através de duas bombas doseadoras.

3.3.1.6. Filtração Terciária em Areia [25]

À saída da decantação secundária, as águas clarificadas sofrem um tratamento terciário. Este tratamento, composto por quatro filtros de areia abertos, aumenta o rendimento de remoção de matérias em suspensão e, por consequência, o rendimento de remoção de CBO_5. Por outro lado, a retenção das

matérias em suspensão no filtro permite aumentar a transmitância da água filtrada, o que favorece o posterior tratamento de desinfeção por ultravioletas.

3.3.1.7. Desinfeção UV [25]

Tendo em conta a proximidade de zonas de contato direto, ou balneares, é fundamental a desinfeção dos efluentes à saída da estação. A desinfeção ultravioleta é das técnicas mais avançadas em matéria de desativação de microrganismos, utilizando a propriedade que possuem os UV, no comprimento de onda de 254 nm, de destruir os microrganismos por rutura das cadeias de ADN portadoras da informação genética. Este processo, que não necessita de nenhuma manipulação de produtos químicos e não provoca nenhuma toxicidade na fauna e na flora do meio recetor, torna-a na solução ecológica por excelência.

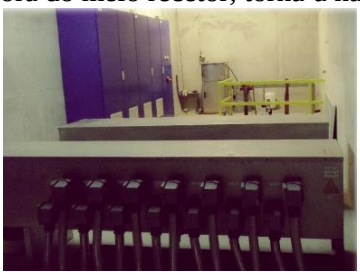


Figura 12- Vista parcial do sistema de desinfeção UV (Fonte: [24]).

Neste caso, a água filtrada irá entrar graviticamente num canal equipado com o sistema de desinfeção, passando posteriormente em direção a uma Cisterna de Água Tratada. Após a desinfeção final, a água tratada atravessa uma cisterna que representa uma reserva de água desinfetada que pode ser utilizada nos diversos setores da instalação. O restante caudal é evacuado através do emissário subestuarino existente.

As características previstas do efluente tratado estão expostas na tabela seguinte (quadro 3):

Quadro 3- Características previstas do efluente final (Fonte: [25]).

Parâmetros	Limite
CBO5 a 20ºC (mg O2/L)	25
CQO (mg O2/L)	125
SST (mg/L)	25
N-total (mg/L)	15
Nitratos (mg N/L)	10
P-total (mg P /l)	10
Coliformes fecais (N/100 mL)	1000
Coliformes totais (N/100 mL)	2000
E-Coli (N/100 mL)	800

3.3.2. Linha de Sólidos [25]

Esta linha é constituída por: poço de recirculação de lamas, flotação, bacia de mistura de lamas, desidratação, armazenamento de lamas.

3.3.2.1. Flotação de Lamas [25]

As lamas em excesso, oriundas de cada uma das linhas de tratamento biológico, são extraídas ao nível dos órgãos de desgaseificação em direção a um Flotador de Lamas. As lamas flotadas são removidas do efluente neste órgão, através de um sistema de insuflação de ar a alta pressão (4 a 6 bar). Este ao entra no flotador sofre descompressão, dando origem à libertação de microbolhas que, ao seguirem o seu movimento ascensional em direção à superfície arrastam consigo as partículas de lamas. O resultado é a formação de uma espessa camada de material flutuante, a qual será raspada permanentemente por uma ponte raspadora e descarregada para uma cuba apropriada. Tratando-se de águas residuais, não é possível flotar a totalidade da matéria em suspensão, pelo que parte dela irá depositar-se no fundo do Flotador. Estas matérias são dirigidas para o centro através de uma raspagem do fundo e são enviadas em direção à "Bacia de Mistura de Lamas" através de uma bomba de parafuso.

Figura 13- Vista parcial do flotador de lamas (Fonte: *[24]*).

3.3.2.2. Bacia de Mistura de Lamas [25]

Para assegurar um bom funcionamento da digestão de lamas, é essencial prever uma alimentação em lamas o mais constante e homogénea possível. Para tal, as lamas flotadas e as lamas primárias são enviadas para uma bacia de mistura, onde são misturadas através de um agitador submersível.

3.3.2.3. Desidratação e Armazenamento de Lamas [25]

As lamas homogeneizadas na Bacia de Mistura de Lamas são desidratadas em duas centrífugas de lamas (de três existentes). A suspensão a tratar é introduzida na centrífuga, onde é sujeita a uma força centrífuga. A montante das centrífugas é injetada a solução de polímero (polielectrólito).

As lamas depois de estabilizadas são bombadas para dois silos de lamas de armazenagem, de onde serão depois descarregadas para camião e enviadas para o destino final.

Figura 14- Vista parcial das centrífugas da desidratação de lamas (Fonte: *[24]*).

3.3.3. DESODORIZAÇÃO [25]

Devido à natureza dos produtos tratados, uma estação de tratamento de águas residuais é, naturalmente, uma fonte de odores. Estes odores têm as suas origens nos gases ou vapores emanados por certos produtos contidos nas águas residuais, ou provenientes das transformações efetuadas no decurso do tratamento.

O processo de desodorização aplicado na estação de tratamento é do tipo adsorção gás-líquido. Os lavadores utilizados são torres de enchimento de plástico que funcionam em contra-corrente, com a adição de reagentes de neutralização (acido sulfúrico, hipoclorito e soda).

Deste modo, o processo consiste na instalação de três colunas de absorção com enchimento- igualmente denominadas torres de lavagem – de tipo vertical, com escoamento em contra-corrente. Em primeiro lugar, na primeira torre de lavagem é efetuada a "lavagem ácida", com ácido sulfúrico, consistindo numa reação de neutralização a qual elimina o amoníaco e as aminas. De seguida, na segunda torre de lavagem é efetuada a "lavagem oxidante", com hipoclorito de sódio, eliminando o sulfureto de hidrogénio, os sulfuretos orgânicos, os mercaptanos, mas também o amoníaco e as aminas. Por último, na terceira torre de lavagem é efetuada a lavagem alcalina, com soda caústica, que elimina os ácidos carboxílicos, o sulfato de hidrogénio, os mercaptanos e também em parte o CO_2.

Figura 15- Vista parcial das torres de lavagem (Fonte: *[24]*).

4
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Atualmente, as ETAR desempenham um papel fundamental na sociedade, uma vez que permitem mitigar contaminações do meio ambiente, bem como melhorar as condições de saneamento e evitar a propagação de doenças e pragas. No entanto, estas instalações caraterizam-se por possuir um elevado consumo energético, associado ao funcionamento dos equipamentos de tratamento, bem como ao sistema de transporte e bombagem de água residual (Halim, 2012). Diversos estudos efetuados demonstram que cerca de 4% de toda a energia gasta nos países desenvolvidos está relacionada com as ETAR. Sabe-se também que, em média, uma ETAR consome cerca de 0,283 a 1,223 kWh/m^3 de água residual tratada. No caso de uma ETAR que possua um sistema de tratamento convencional por lamas ativadas e que sirva um caudal diário de 13 000 m^3 de água residual, o consumo energético pode chegar aos 15 899 kWh/dia, o correspondente a 5,8 MWh/ano [26].

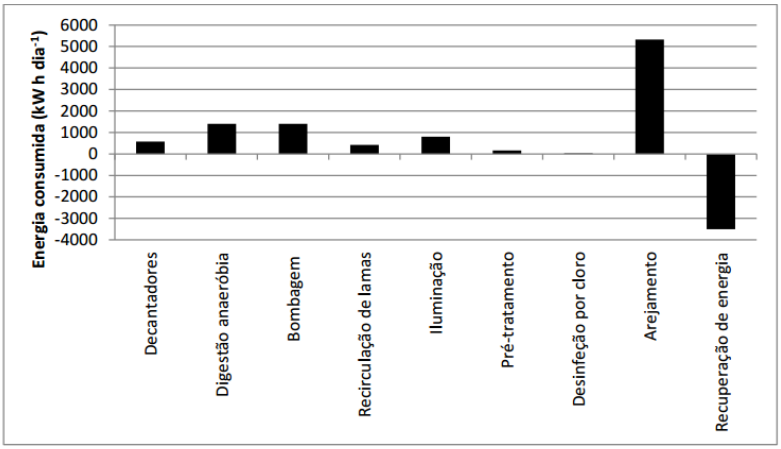


Figura 16- Energia consumida numa ETAR de grandes dimensões (Fonte: *[26]*).

Numa ETAR que possua tratamento por lamas ativadas, os três principais processos que contribuem para o elevado consumo energético são: arejamento (devido à grande exigência energética necessária ao contínuo fornecimento de oxigénio para o crescimento dos microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico); bombagem da água residual (pois existe a necessidade de transportar a água residual para as diversas etapas do tratamento); e digestão anaeróbia (devido à necessidade de aquecimento das lamas no tanque de digestão para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, no

entanto esta energia pode ser compensada pela produção de biogás) [5]. Contudo, estes valores diferem consoante as dimensões da ETAR e suas tecnologias.

Posto isto, tem surgido a necessidade de investigar novos métodos de tratamento que permitam maximizar a conversão de matéria orgânica presente na água residual em energia e minimizar a energia requerida para remover sólidos e nutrientes, de modo a atingir uma eficiência energética mais favorável a nível económico e ambiental. Atualmente, a gestão de energia é fundamental para uma utilização racional da energia, bem como para permitir reduzir os desperdícios energéticos, associados às limitações inerentes aos processos tecnológicos e ao descuido dos próprios consumidores. Ora, é necessário, em primeiro lugar, adotar medidas que possibilitem uma utilização apropriada da energia desperdiçada, para, posteriormente, considerar outros sistemas de recuperação energética. Para esse efeito, procede-se à quantificação da energia consumida e à determinação das perdas energéticas dos principais equipamentos, recorrendo a um método de medição das formas de energia, envolvidas num dado processo fabril. Assim, com o intuito de obter uma visão global da situação energética e de definir uma utilização racional do consumo de energia, as auditorias energéticas constituem uma tecnologia promissora, determinando como e onde se consome a energia e se esse consumo é o mais adequado. Salienta-se que a distribuição conveniente da quantidade de energia pelos diversos departamentos existentes na instalação em estudo permitem efetuar uma avaliação dos pesos relativos das formas de energia consumida, promovendo uma estratégia de atuação no sentido de solucionar rápida e eficazmente as situações mais críticas [27].

4.1. AUDITORIA ENERGÉTICA

A eficiência energética é um dos fatores principais para um controlo efetivo de custos, resultando do acompanhamento e análise contínua dos sistemas. Com recurso a essa avaliação é que é possível determinar as medidas mais adequadas conducentes a esse objetivo. Por conseguinte, surge a auditoria energética como um instrumento essencial para um gestor de energia, pois permite analisar o processo inerente à gestão dos consumos e recursos energéticos das instalações. A auditoria energética é, portanto, um exame detalhado das condições de utilização de energia numa instalação, visando facilitar uma utilização mais económica e eficiente de energia, sem afetar a produção. Esta ferramenta permite contabilizar os consumos e os rendimentos energéticos dos equipamentos, assim como possíveis perdas, de maneira a identificar as medidas mais adequadas para as reduzir [28].

O faseamento de uma auditoria depende naturalmente do seu âmbito, assim como da dimensão e do tipo das instalações a auditar. Malgrado, considera-se que a realização de uma auditoria energética engloba os seguintes passos [27]:

- Efetuar um levantamento, em termos energéticos, das várias formas de energia consumidas e das necessidades energéticas específicas de utilização e de cada divisão da empresa;
- Analisar os registos históricos dos consumos das diversas formas de energia envolvidas, com discriminação mensal dos fluxos energéticos;
- Elaboração de balanços energéticos (efetuados à instalação global, a cada um dos setores, aos equipamentos de maiores consumos e às instalações de transformação de energia) e avaliação da desagregação dos consumos;
- Identificar as principais áreas de intervenção, com vista a racionalizar os consumos energéticos e a diminuir os custos;

Posteriormente, é realizado um relatório final. Neste relatório consta, de forma organizada, toda a informação obtida: a análise sobre a situação energética da instalação em causa; a determinação de consumos específicos de energia por instalação global e operações e equipamentos maiores

consumidores de energia incluindo a sua comparação com valores de referência; a identificação das anomalias e propostas das medidas de conservação de energia consideradas mais convenientes para anular ou diminuir as anomalias, com a indicação dos respetivos valores de investimentos associados à sua implementação [28].

Todo o processo associado à auditoria energética assenta na legislação portuguesa de gestão de consumos de energia, que se encontra expressa no Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de Abril, alterado pelo Decreto-Lei n.º 7/2013, de 22 de Janeiro, e complementado pela Portaria n.º 519/2008, de 25 de Junho, e pelos Despachos n.º 17313/2008, de 26 de junho, e n.º 17449/2008, de 27 de junho. Esta legislação regula o sistema de gestão dos consumos intensivos de energia (SGCIE), com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia. As empresas e instalações consumidoras intensivas de energia (CIE) são aquelas em que se verifica um consumo energético superior a 500 tep/ano, com a exceção das instalações de cogeração juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia. O Decreto-Lei mencionado também estabelece quais as ações a implementar nas instalações consideradas como CIE, isto é, caso o consumo energético ultrapasse 1 000 tep/ano:

- Analisar, de 6 em 6 anos, as condições em que as suas instalações operam no que diz respeito à utilização de energia;
- Elaborar um plano de racionalização do consumo de energia (PREn), com estabelecimento de metas relativas à intensidade energética e à intensidade carbónica, a ser sujeito à aprovação da DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia, via ADENE;
- Implementar as medidas de racionalização de energia propostas naquele PREn, através de investimentos feitos ao longo dos 3 primeiros anos subsequentes, desde que com um período de retorno (PRI) inferior ou igual a 5 anos;
- Cumprir o referido plano, sob responsabilidade de um técnico credenciado.

4.2. Consumos Energéticos na ETAR de Sobreiras

A instalação em estudo está abrangida pela definição de consumidor intensivo de energia. Como referido no ponto anterior, de acordo com a legislação atual, as instalações CIE devem ser objeto de uma avaliação das condições em que atuam relativamente à utilização de energia. Posto isto, foi realizada uma auditoria energética às instalações da ETAR de Sobreiras. Com base nessa auditoria, tomando como referência o ano de 2013 e sabendo que a ETAR utiliza como formas de energia a energia elétrica (adquirida à EDP Comercial – Comercialização de Energia, S.A.) e a energia térmica (a partir de gás natural), constatou-se que o consumo energético global foi de 2 388,3 tep (toneladas equivalentes de petróleo) (quadro 4).

Quadro 4- Montantes globais de consumo de energia em 2013 (Fonte: [27]).

Energia Elétrica	11 051,87 MWh	2 376,15 tep
Gás Natural	9 654 m^3	12,15 tep
Total	-	**2 388,30 tep**

4.2.1. Principais Equipamentos Consumidores de Energia

As instalações técnicas da ETAR de Sobreiras possuem um conjunto significativo de acionamentos eletromecânicos (Compressores, Ventiladores, Bombas de águas residuais e de lamas, Agitadores, Arejadores) essenciais ao normal funcionamento dos processos aí decorrentes. De seguida apresenta-se uma descrição dos principais sistemas consumidores de energia.

- 3 Compressores centrífugos (CR04, CR05 e CR10), um dos quais de reserva, para arejamento dos tanques biológicos acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 450 kW, equipados com arrancador suave (soft-starter);
- 2 Compressores centrífugos (CR11e CR12), um dos quais de reserva, para lavagem dos filtros em areia, acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 75 kW, equipados com arrancador suave (soft-starter);
- 3 Compressores centrífugos (CR01a CR03), um dos quais de reserva, para arejamento dos tanques biológicos de gorduras, acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 38 kW, com arranque Estrela-Triângulo;
- 3 Compressores centrífugos (CR14 a CR16), para o desarenamento nos sedipac's, acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 11 kW, com arranque direto;
- 3 Centrifugas (DC01 a DC03) para desidratação das lamas, uma das quais de reserva, constituídas, cada uma, por um rotor e um parafuso acionados por motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potências estipuladas de 75 e 15 kW, com controlador incorporado;
- 3 Ventiladores (VC12 a VC14), um dos quais de reserva, para aspiração do ar poluído da instalação e encaminhamento para torres de lavagem, acionados por motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 55kW, equipados com arrancador suave (soft-starter);
- 4 Bombas centrífugas submersíveis (BS01 a BS04-Reserva) de elevação inicial do efluente acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 120 kW, equipados com arrancador suave (soft-starter);
- 2 Bombas centrífugas (BS05 e BS06-Reserva) de elevação de escorrências acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 5,5 kW, equipados com arranque direto comandado através de interruptores de nível;
- 3 Bombas de parafuso excêntrico (BP12 a BP14) para extração de lamas primárias dos Sedipac´s acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 4 kW, equipados com arranque direto comandado através de detetor de nível e com temporização de funcionamento;
- 4 Bombas centrífugas (BS13 a BS16) para recirculação de lamas desde os decantadores até aos tanques biológicos acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 62kW, equipados com arrancador suave (soft-starter) comandado a partir de interruptoresde nível;
- 4 Bombas centrífugas (BS17 a BS20), duas das quais de reserva, para extração das lamas em excesso dos tanques biológicos para o flotador acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 38 kW, com arranque Estrela-Triângulo (Y-D) comandadas a partir da sala de comando;
- 2 Bombas centrífugas (BS25 a BS26), uma das quais de reserva, para bombagem da água da bacia de água suja para a entrada dos sedipac´s acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 38 kW, com arranque Estrela-Triângulo (Y-D) comandadas em automático por interruptores de nível;
- 6 Bombas centrífugas de eixo horizontal (BH20 a BH25), três das quais de reserva, para recirculação dos reagentes das torres de lavagem do sistema de desodorização (duas por torre) acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 30 kW, com arranque Estrela-Triângulo (Y-D) comandadas em automático;

- 4 Bombas centrífugas (BS09 a BS12) para recirculação do licor misto da zona aeróbia para a zona anóxica do tratamento biológico acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 18 kW, com arranque direto comandadas em automático;
- 2 Bombas centrífugas (BS23 a BS24), para injeção de água para lavagem dos filtros em areia acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 12,5 kW, com arranque direto e comandadas em automático;
- 2 Bombas centrífugas (BS21 a BS22) para extração de lamas em excesso dos poços de recirculação de lamas, acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 11,8 kW, com arranque direto e comandadas em automático por temporização na sala de comando;
- 2 Bombas de parafuso excêntrico (BP02 e BP03), uma das quais de reserva, para recirculação de lamas da bacia de armazenamento para a bacia de mistura de lamas acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 9,2 kW, com arranque direto;
- 3 Bombas de parafuso excêntrico (BP04 a BP06), uma das quais de reserva, para bombagem das lamas da bacia de mistura de lamas para as centrífugas acionadas por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 9,2 kW, com arranque direto;
- 3 Maceradores de lamas (DL01 a DL03) das bombas BP04 a BP06 acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 4 kW, com arranque direto;
- 3 Agitadores de fundo (AS16 a AS18) das bacias de mistura e armazenamento de lamas acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 7,5 kW, com arranque direto;
- 6 Agitadores submersíveis (AS05 a AS12) das cubas Anóxicas e Endógenas do tratamento biológico acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 4,8 kW, com arranque direto;
- 12 Arejadores submersíveis (AF01 a AF12) das dos sedipac's acionados por outros tantos motores de indução trifásicos de eficiência Standard (comparável à nova designação IE1), com potência estipulada de 2,2 kW, com arranque direto;

No quadro 5 apresenta-se o número de horas de funcionamento dos principais consumidores no ano de referência (2013).

Quadro 5- Número de horas de funcionamento e potência estipulada dos principais equipamentos (Fonte: *[27]*).

Código	Equipamento	TF (horas)	PN (kW)
CR04	Compressor de ar para a Bacia de Arejamento 1	5 829	450
CR05	Compressor de ar para a Bacia de Arejamento 2	0	450
CR10	Compressor de ar de reserva para as Bacias de Arejamento	6 296	450
BS01	Bomba 1 do poço de Elevação Inicial	8 431	120
BS02	Bomba 2 do poço de Elevação Inicial	4 474	120
BS03	Bomba 3 do poço de Elevação Inicial	14	120
BS04	Bomba 4 do poço de Elevação Inicial	0	120
DC01	Centrífuga de lamas 1	4 196	90
DC02	Centrífuga de lamas 2	3 862	90
DC03	Centrífuga de lamas 3	1 154	90
CR11	Compressor 1 de ar de lavagem dos Filtros	574	75
CR12	Compressor 2 de ar de lavagem dos Filtros	246	75

BS13	Bomba 1 de recirculação de lamas para o arejamento 1	4 929	62
BS14	Bomba 2 de recirculação de lamas para o arejamento 1	7 019	62
BS15	Bomba 1 de recirculação de lamas para o arejamento 2	8 573	62
BS16	Bomba 2 de recirculação de lamas para o arejamento 2	5 639	62
VPC1	Ventilador 1 da desodorização	536	55
VPC2	Ventilador 2 da desodorização	8 192	55
VPC3	Ventilador 3 da desodorização	8 729	55
CR01	Compressor de ar para Biomaster 1	7 977	38
CR02	Compressor de ar para Biomaster 2	757	38
CR03	Compressor de ar para Biomaster 3	0	38
BH20	Bomba de recirculação 1 da torre de lavagem ácida	8 716	30
BH21	Bomba de recirculação 2 da torre de lavagem ácida	0	30
BH22	Bomba de recirculação 1 da torre de lavagem oxidante	4 290	30
BH23	Bomba de recirculação 2 da torre de lavagem oxidante	4 407	30
BH24	Bomba de recirculação 1 da torre de lavagem alcalina	8 678	30
BH25	Bomba de recirculação 2 da torre de lavagem alcalina	0	30
BS09	Bomba 1 de recirculação do licor misto do arejamento 1	2 686	18
BS10	Bomba 2 de recirculação do licor misto do arejamento 1	7 399	18
BS11	Bomba 1 de recirculação do licor misto do arejamento 2	7 384	18
BS12	Bomba 2 de recirculação do licor misto do arejamento 2	2 724	18
CR14	Compressor de ar do Sedipac 1	8 730	11
CR15	Compressor de ar do Sedipac 2	6 402	11
CR16	Compressor de ar do Sedipac 3	8 307	11

4.2.2. Desagregação dos Consumos Energéticos por Setor/Equipamento

Recorrendo aos dados fornecidos pela empresa e à auditoria realizada pela equipa do INEGI, foi possível desagregar o consumo de energia elétrica da instalação, pelos seus principais setores/equipamentos consumidores de energia, tendo-se apurado o seguinte (figura 18):

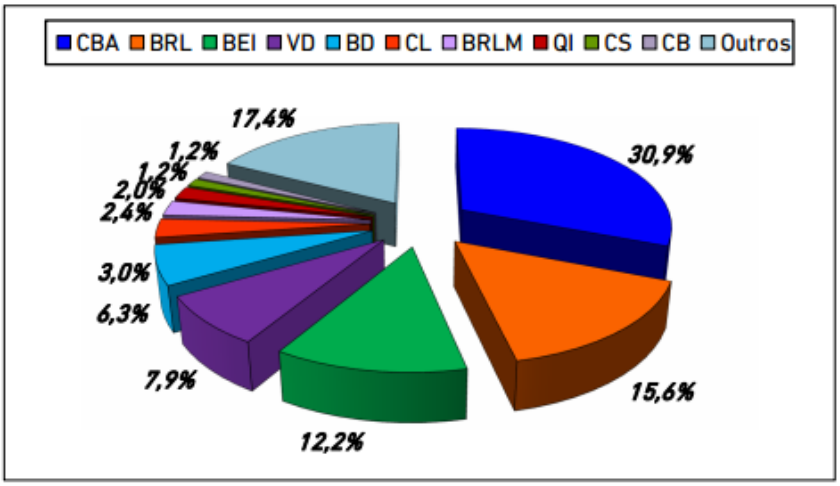


Figura 17- Repartição sectorial de consumos elétricos (Fonte: [27]).

- Compressores das bacias de arejamento (CBA): 666,1 tep, isto é, 30,9% do total de energia elétrica consumida pela ETAR em 2013;
- Bombas de recirculação de lamas para o arejamento (BRL): 335,3 tep, ou seja, 15, 6% do mesmo montante, no período em análise;
- Bombas de elevação inicial (BEI): 261,9 tep, ou seja, 12,2 % do mesmo montante, no mesmo período;
- Ventiladores da desodorização (VD): 169,9 tep, ou seja, 7,9% do mesmo montante, no mesmo período;
- Bombas das torres de desodorização (BD): 134,7 tep, ou seja, 6,3% do mesmo montante, no mesmo período;
- Centrífugas de lamas (CL): 64,2 tep, ou seja, 3,0% do mesmo montante, no mesmo período;
- Bombas de recirculação do licor misto do arejamento (BRLM): 51,4 tep, ou seja, 2,4% do mesmo montante, no mesmo período;
- Quadros de iluminação (QI): 43,3 tep, ou seja, 2,0% do mesmo montante, no mesmo período;
- Compressores dos Sedipac's (CS): 26,2 tep, ou seja, 1,2% do mesmo montante, no mesmo período;
- Compressores dos Biomaster's (CB): 26,1 tep, ou seja, 1,2% do mesmo montante, no mesmo período;
- Outros (equipamentos cuja desagregação era inviável do ponto de vista logístico e cujo peso individual no cômputo geral é negligente): 374,0 tep, ou seja, 17,4% do mesmo montante, no mesmo período.

Posto isto, concluiu-se que os grandes consumidores de energia na ETAR de Sobreiras são os compressores de arejamento dos tanques biológicos, as bombas de elevação inicial, as bombas de recirculação de lamas e o sistema de desodorização.

4.3. Medidas de Redução do Consumo de Energia

Tipicamente, a solução encontrada para melhorar a eficiência energética nas ETAR consiste em recorrer à utilização de sistemas anaeróbios, para produção de biogás [29]. Por outro lado, existe também a possibilidade de otimizar o processo aeróbio, através da melhoria das operações unitárias no primário, com o intuito de reduzir o arejamento e de aumentar a produção de biogás. Para esse efeito, procede-se à otimização de remoção de matéria orgânica, através da aplicação de, por exemplo, uma etapa de coagulação/floculação, que permite minimizar a carência de oxigénio nos processos de tratamento secundários. Nesta etapa, o material removido adiciona-se ao sistema de tratamento de lamas, através da digestão anaeróbia, visando a produção de energia [7]. De facto, com o objetivo de tornar mais sustentável o processo global de tratamento, torna-se fulcral reduzir a carga orgânica resultante do tratamento primário, de maneira a minimizar os gastos energéticos no processo biológico subsequente (o qual constitui o maior consumidor de energia, devido ao arejamento forçado). É importante encontrar um equilíbrio entre a qualidade e a energia, uma vez que se tem que ter em conta que a uma elevada qualidade do efluente normalmente correspondem maiores gastos energéticos.

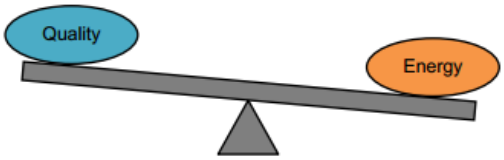


Figura 18- Qualidade vs Energia (Fonte: [30]).

Tendo em vista os consumos energéticos por setores, procede-se, de seguida, ao aprofundamento das medidas sugeridas para redução dos gastos de energia na ETAR de Sobreiras.

4.3.1. Sistemas de Gestão de Energia

A ETAR deve efetuar frequentemente a atualização do sistema de gestão de energia, vigilância e alerta, com integração de "smart-systems" que permitam correlacionar os consumos de energia com as variáveis do processo. Desta forma, recomenda-se que os analisadores de rede existentes na instalação estejam dotados de tecnologia que permita efetuar o registo histórico dos consumos de energia e o seu cruzamento com os dados de produção (caudais volumétricos de efluente, lamas, entre outros). É também fundamental que sejam realizadas avaliações frequentes acerca do estado de funcionamento dos mesmos.

Por outro lado, sugere-se a existência de analisadores de energia nos principais equipamentos consumidores de energia, nomeadamente nos compressores de arejamento, nas bombas de elevação inicial, nas bombas de recirculação de lamas, nos ventiladores da desodorização, nas bombas de recirculação das torres e nas centrífugas. Assim, a implementação de um sistema de monitorização de energia irá permitir: gerir e repartir os consumos e custos pelos diversos setores; identificar as áreas críticas onde devem ser tomadas as medidas de racionalização de consumos; determinar as poupanças e os ganhos obtidos devido à implementação das medidas; e detetar avarias dos equipamentos que provoquem desvios de consumo.

Por ultimo, aconselha-se a criação do cargo de Gestor de Energia, que seja responsável por determinar as razões dos consumos de energia da instalação, onde e como é consumida, bem como os respetivos custos. Este é também encarregue de elaborar um plano anual de energia que descreva os objetivos a atingir e as medidas a adotar.

4.3.2. Sistemas de Elevação Inicial

Em 2013, o sistema de elevação inicial de efluente foi responsável por 12% do consumo global de energia elétrica da ETAR. A auditoria efetuada demonstrou que o sistema apresenta um rendimento global de bombagem muito baixo, a rondar os 48% como resultado do tipo de controlo de caudal imposto, através de estrangulamento mecânico por fecho de válvulas, provocando uma perda de carga artificial. Assim, sugere-se a substituição das atuais bombas de elevação inicial por bombas equipadas com conversor de frequência.

4.3.3. Sistema de Climatização do Edifício Administrativo

Atendendo ao facto do ar dos compressores, o qual será posteriormente utilizado nos tanques biológicos, conter um grande potencial térmico, uma vez que possuem simultaneamente valores elevados de temperatura (85 a 105ºC) e de caudal (6500-10000 m^3/h), pretende-se recuperar essa carga térmica através da montagem de um permutador de calor ar/água na conduta de ar de um dos tanques do tratamento biológico para o aquecimento do edifício administrativo. Com o intuito de abolir o contrato de fornecimento de gás natural, recomenda-se também a aquisição de uma bomba de calor para colmatar as necessidades de frio no período de estio.

4.3.4. TRATAMENTO PRIMÁRIO

Como já foi referido, ao aumento da eficiência de remoção do tratamento primário corresponde uma redução de energia fornecida ao tratamento secundário, uma vez que a carga orgânica afluente ao tanque de arejamento irá ser menor. Assim, de modo a diminuir o carbono orgânico total do efluente, assim como a CQO, CBO_5 e SST, pode recorrer-se, por exemplo, ao processo de coagulação/floculação associado à utilização de biopolímeros (como as sementes de M. oleífera) no tratamento primário. É importante referir que, devido ao fato dos biopolímeros serem biodegradáveis, o seu uso apresenta mais benefícios do que o processo de tratamento convencional, permitindo uma maior eficiência de remoção de matéria orgânica e a produção de lamas de melhor qualidade [31].

4.3.5. AREJAMENTO

As principais perdas de eficiência energética em um sistema de distribuição de ar comprimido são decorrentes da queda de pressão entre o compressor e os pontos de consumo de ar, ou ainda de vazamentos de ar [46]. As principais oportunidades de melhoria da eficiência para as áreas de geração, distribuição e uso final de um sistema de ar comprimido estão listadas no quadro 6 (apresentando a percentagem de situações onde a medida é aplicável, assim como a percentagem de redução no consumo anual de energia).

Quadro 6- Oportunidades de melhoria de eficiência em um sistema de ar comprimido genérico (Fonte: [46]).

Medidas de Economia de Energia	Aplicabilidade	Ganhos
Instalação ou Renovação do Sistema		
Melhoria dos acionamentos (motores de alta eficiência)	25%	2%
Melhoria dos acionamentos (reguladores de velocidade)	25%	15%
Troca de compressores por versões mais modernas (aperfeiçoamento)	30%	7%
Uso de sistema de controlo sofisticado	20%	12%
Recuperação de calor rejeitado para uso em outras funções	20%	20%
Melhoria no resfriamento, secagem e filtragem do ar	10%	5%
Projeto global do sistema, incluindo sistema de multipressões	50%	9%
Redução na perda por queda de pressão	50%	3%
Otimização de dispositivos (equipamentos) de uso final	5%	40%
Manutenção e operação do sistema		
Redução de vazamentos de ar	80%	20%
Substituição de filtros mais frequente	40%	2%

De modo a otimizar o sistema de produção de ar do tratamento biológico da ETAR de Sobreiras, deve estudar-se a possibilidade de reduzir o número de compressores utilizados, através de, por exemplo, o escalonamento de um único compressor para suprir as necessidades de oxigénio dos dois tanques existentes. Para isso, é necessário instalar uma válvula moderadora em cada uma das condutas dos tanques biológicos, de forma a controlar o fornecimento do caudal de ar em cada tanque. Assim, é possível reduzir os gastos energéticos ao operar com somente um compressor. É então previsto que somente no período de estio seja necessário recorrer aos dois compressores em simultâneo.

Para obter melhores resultados, é possível reduzir as perdas devido à temperatura do ar aspirado pelo compressor. Quanto mais baixa for a temperatura do ar aspirado, maior será a quantidade de massa de ar que poderá ser aspirada pelo compressor com a mesma vazão volumétrica aspirada e mesma potência consumida neste trabalho, isto porque o ar mais frio é mais denso. Então, maior massa de ar poderá ocupar o mesmo volume do que quando ele está mais aquecido. Portanto, é importante evitar que os

compressores aspirem ar no interior do recinto onde estão instalados, cuja temperatura é sempre mais alta que a do ar atmosférico externo. Nesse sentido, podem-se providenciar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar do exterior da sala de máquinas. Assim sendo, recomenda-se que a tomada da aspiração de ar seja feita do exterior da sala de compressores. Caso seja necessário canalizar a tomada de ar, esta deve ser curta, reta e de grande diâmetro, e o filtro deverá ser mantido sempre limpo, para que a perda de carga na aspiração seja a menor possível. Para cada 25 mbar de queda de pressão na aspiração, o rendimento global do compressor é reduzido em 2%, tomando-se como base a temperatura de referência de 21 ºC.

Quadro 7- Variação do consumo com a temperatura de aspiração (Fonte: [46]).

Temperatura do ar de aspiração (ºC)	Potência economizada ou incrementada
-1,0	7,5% (economizado)
4,0	5,7% (economizado)
10,0	3,8% (economizado)
16,0	1,9% (economizado)
21,0	0,0
27,0	1,9% (incrementado)
32,0	3,8% (incrementado)
38,0	5,7% (incrementado)
43,0	7,6% (incrementado)
49,0	9,5% (incrementado)

De igual modo, devem ser adotadas medidas que permitam reduzir a perda de carga por sujeira no filtro de aspiração. O ar atmosférico admitido pelo compressor de ar, apesar de ser filtrado à entrada (filtro primário), contém várias impurezas, invisíveis a olho nu. Entre elas, pode destacar-se duas principais: vapor de água (humidade) e particulados (poeiras). Então, as instalações de ar comprimido devem possuir um filtro de ar na aspiração (filtro primário) para evitar a entrada de grandes partículas e sujeiras carregadas pelo ar atmosférico. No caso de não existir uma manutenção programada nesse filtro, a sujidade acumula-se, fechando, parcial e até totalmente os poros do filtro, o que acarretará aumento da perda de carga no filtro, representando um aumento do consumo de energia do motor de acionamento do compressor para a realização do mesmo serviço que faria com o filtro limpo. Desta maneira, na ETAR de Sobreiras, o filtro deve ser limpo com mais frequência e deve ser reparado o sistema que os compressores possuem que avisa quando o filtro necessita de ser lavado.

Salienta-se, ainda, o facto dos compressores instalados na ETAR de Sobreiras possuírem um sistema de regulação de caudal entre 45% e 100% do caudal nominal através da variação da abertura dos difusores. Desta maneira, para um maior rendimento, através da figura 20, verifica-se que os mesmos não devem operar a carga parcial (isto é, para o caudal mínimo).

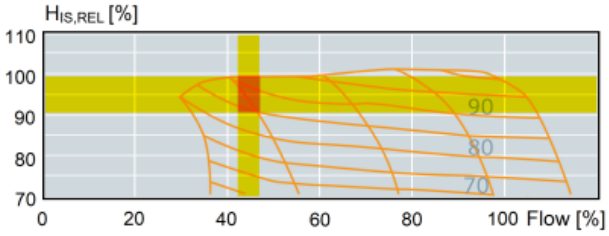


Figura 19- Curvas de desempenho para compressor do tipo S (Fonte: (27]).

Assim, o mais indicado é que os compressores operem com um sistema de controlo Dual-point (sistema combinado de variação das alhetas de admissão de ar e a variação de alhetas dos difusores).

Com o intuito de reduzir os gastos energéticos nesta etapa de tratamento, recomenda-se a realização de ajustes no equipamento, de modo a operarem automaticamente de acordo com as condições do sistema, em vez de serem efetuadas adaptações manuais. Para além disso, as ETAR devem avaliar regularmente o estado em que se encontra o equipamento. Sabe-se que o equipamento que possua já muitos anos e que esteja no seu fim de vida tem um menor rendimento e consome mais energia que os modelos novos, podendo a sua reparação acarretar custos muito elevados. Deste modo, é necessário substituir compressores que possuam pouca eficiência na transferência de oxigénio, isto é, que utilizem mais energia do que a esperada pelos níveis de oxigénio dissolvido obtidos. Como é o equipamento que consome mais energia e, se estiver perto do seu fim de vida, é aconselhada a sua substituição por um modelo com maior rendimento.

Por sua vez, deve também efetuar-se a conexão do medidor de DO ao sistema de aquisição de dados, permitindo assim monitorizar e registar os níveis de DO continuamente. Assim, pode atingir-se maiores poupanças energéticas se esses dados de DO foram utilizados para controlar automaticamente a velocidade do agitador e o fornecimento de ar pelos compressores. É também importante efetuar o registo automático dos valores cumulativos do caudal de ar enviado para os tanques de arejamento (medido à saída de cada compressor por um caudalímetro), de maneira a efetuar uma melhor gestão do setor. De fato, a possibilidade de medir e registar caudais volúmicos é uma mais-valia para o operador da instalação, pois permite o cruzamento com os consumos de energia dos equipamentos ou setores e a consequente monitorização dos consumos específicos de energia.

Por último, recomenda-se também a utilização dos agitadores somente quando o compressor não estiver a operar, o que irá reduzir bastante os gastos de energia associados a este processo.

4.3.6. Infiltração, Afluência e Vazamentos

As infiltrações de água subterrânea podem ser um grande contributo para o caudal afluente à ETAR. É, por isso, importante, realizar limpezas e inspeções regulares à tubagem do sistema de recolha de águas residuais, de maneira a reduzir as infiltrações e, consequentemente, a quantidade de águas residuais a ser tratada. É indubitável que uma quantidade considerável de energia é desperdiçada no tratamento de águas subterrâneas que se infiltram nos sistemas através de tubos que possuem falhas ou que se encontram desalinhados. De igual modo, existem vazamentos no sistema coletor que provocam o aumento da energia necessária para bombear o esgoto até à ETAR. É também aconselhado realizar uma investigação e desenvolvimento de turbinas geradoras de energia que minimizem perdas de carga nas tubagens.

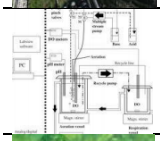
4.3.7. Energias Renováveis

A incorporação de energias renováveis (eólica, solar, entre outras) nas instalações permite reduzir os gastos associados à compra de energia, sem alterar a eficiência dos processos. Assim, as energias renováveis são potenciais fontes de energia que permitem maximizar a produção da mesma. Por sua vez, é importante transformar as instalações de locais de consumo para locais de produção de energia. É o caso das ETAR com digestão anaeróbia, que conseguem criar calor através da captura de emissões de biogás como combustível para geração de energia no próprio local. Deste modo, recomenda-se então o aumento da produção energética nas instalações existentes com integração de sistemas de armazenamento e de produção de energia renovável, bem como a implementação de processos e modelos de gestão (como, por exemplo, a instalação de painéis fotovoltaicos).

4.3.8. Produção de Energia

Atualmente, tem vindo a ser desenvolvidas diversas tecnologias que possibilitem a produção de energia nas Estações de Tratamento de Águas Residuais, entre elas: a digestão anaeróbia; a conversão termal; a recuperação de calor; os biorreatores de algas; e as hidroturbinas. As caraterísticas gerais das mesmas encontram-se expostas no seguinte quadro (quadro 8):

Quadro 8- Tecnologias promissoras para produção de energia em ETAR (Fonte: *[32]*).

Tecnologia		Descrição
	Digestão Anaeróbia	Degradação de matéria orgânica por microrganismos (na ausência de O_2), da qual resulta o biogás, que, sendo uma fonte de energia, pode ser utilizado para produção de energia elétrica
	Conversão Termal	Processo de bio-remediação que consiste na conversão de hidrocarbonetos e resíduos orgânicos em combustíveis alternativos não poluentes
	Recuperação de Calor	Recolha e utilização do calor resultante de um determinado processo, que de outra forma iria ser perdido
	Células de combustível microbianas	Conversão de energia química em energia elétrica a partir de uma reação catalítica de microrganismos
	Biorreatores de algas	Fotoreatores utilizados para a produção de combustíveis (como o biodiesel) a partir da fotossíntese das algas
	Hidroturbinas	Equipamento que converte a energia cinética e potencial da água em trabalho mecânico

Posto isto, recomenda-se a realização de um estudo de forma a determinar a viabilidade de aplicação destas tecnologias na ETAR em estudo.

4.3.9. Campanhas de Sensibilização

A realização de campanhas de sensibilização pode permitir a redução substancial do uso de água e, consequentemente, da produção de efluentes. Desta maneira, podem ser implementados vários programas para incentivar os membros da comunidade, empresas e/ou indústrias a reduzir os consumos de água. Para reduzir a quantidade de efluente a ser tratado e a energia utilizada para o efeito, podem adotar-se medidas como, por exemplo, a criação de programas de educação pública com o objetivo de mudar os comportamentos, a reutilização da água, e ainda a atribuição de prémios para quem reduzir os consumos ou de uma taxa de desconto para realizar auditorias energéticas.

5
RESPIROMETRIA NA OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Os sistemas de arejamentos convencionais utilizados no tratamento de lamas ativadas constituem cerca de 45 a 60 % da energia total utilizada na ETAR. Deste modo, é fundamental, numa primeira instância, avaliar a eficiência do processo e definir quais as medidas a tomar de forma a reduzir o consumo e gastos energéticos nesta etapa do tratamento. [33]

Com o intuito de determinar a eficiência do tratamento de águas residuais recorre-se tipicamente a análises físico-químicas de parâmetros como o CQO, CBO_5 e SST, bem como à observação microscópica da lama ativada [34]. No entanto, apesar da relevância destes parâmetros, a informação fornecida por estes pode não ser suficiente para caraterizar eficazmente o estado da biodegradação no reator biológico naquele instante. Para além disso, no caso de estar perante uma situação problemática, não é possível entender a razão, isto é, se é justificada por uma descarga mal efetuada ou se resulta de um arejamento insuficiente, por exemplo [35]. Por este motivo, tem vindo a ser desenvolvidas novas técnicas que possibilitem efetuar uma análise mais eficaz, rápida e esclarecedora acerca das variáveis que afetam o sistema de lamas ativadas [36]. Nessa perspetiva surgiu a técnica de respirometria, que avalia o factor mais limitantes nas lamas ativadas: a quantidade de oxigénio disponível. De fato, se a quantidade do mesmo não for suficiente, a biomassa não consegue assegurar a biodegradação do efluente. Por outro lado, se existir em excesso (devido a um arejamento excessivo) não irá ser promovido um aumento da quantidade de matéria biodegradada e os custos energéticos serão maiores. De uma maneira global, em termos de arejamento, recentemente foram efetuados estudos que demonstram que o tanque biológico deve possuir uma quantidade de oxigénio que assegure a respiração endógena dos organismos, ou seja, igual ao oxigénio crítico, o qual é normalmente inferior a 1 mg/l (dependendo dos microrganismos presentes). Numa ETAR com população aclimatada, a concentração de oxigénio crítico é de 0,6 mg/l, aproximadamente [37].

Em suma, de modo a aumentar a eficiência do processo, torna-se fulcral adequar a quantidade de oxigénio fornecida pelos sistemas de arejamento, determinando as necessidades de oxigénio total e real (face à baixa solubilidade do oxigénio em água) e averiguando se o fornecimento de oxigénio é o mais ajustado face ao oxigénio crítico para as condições operacionais atuais.

5.1 RESPIROMETRIA

A respirometria é uma técnica na qual é medida e interpretada a taxa de consumo biológico de oxigénio (quantidade de oxigénio consumido por unidade de volume e tempo- OUR), sob condições experimentais bem definidas, de modo a determinar a atividade respiratória de uma comunidade. A taxa

de respiração é medida através de um equipamento denominado por respirómetro, sendo frequentemente os dados recolhidos apresentados sob a forma de um respirograma, que constitui uma representação gráfica da taxa de respiração em função do tempo [38].

Atualmente, a respirometria representa uma das principais ferramentas para otimização de processos biológicos e avaliação da tratabilidade de efluentes orgânicos. A informação obtida, em tempo real, das características do afluente permite reduzir gastos de energia elétrica com o arejamento e identificar, com antecedência, possíveis reduções de desempenho no processo, podendo associá-los a afluências tóxicas. Por conseguinte, esta técnica tem como principais vantagens [39]:

- Identificar o grau de toxicidade de poluentes no processo de tratamento biológico;
- Avaliar a biodegradabilidade do afluente;
- Medir a taxa de nitrificação;
- Proporcionar a otimização do processo de arejamento, com redução dos respetivos custos;
- Determinar, experimentalmente, o valor das constantes de crescimento e de decaimento da biomassa, entre outros parâmetros necessários à modelação de processos de tratamento por lamas ativadas.

Este método tem vindo a desempenhar um papel fundamental no controlo do processo de lamas ativadas, uma vez que é baseado na ligação direta entre a taxa de consumo de substrato e a taxa de consumo de oxigénio, em condições aeróbias. Factualmente, os microrganismos obtém a energia necessária para a manutenção celular, crescimento e reprodução através da formação de adenosina trifosfato (ATP). Para esse efeito, os compostos orgânicos e inorgânicos atuam como dadores de eletrões e o oxigénio comporta-se como o aceitador final de eletrões [40]. Além disso, sabe-se que neste processo de respiração aeróbia de biomassa heterotrófica, parte do substrato que é consumido é reorganizado em nova matéria celular ($Y_{x/S}$) e a outra parte do substrato é transformando em energia e outros elementos químicos ($Y_{O2/S}$), sendo que, tipicamente, cerca de metade do substrato é convertido em nova biomassa [41].

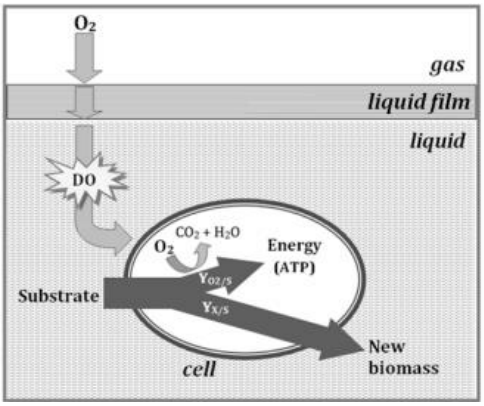


Figura 20- Representação esquemática da relação entre a transferência de oxigénio, a respiração, o consumo de substrato e o crescimento da biomassa (Fonte: [40]).

Todavia, para além deste processo de consumo de oxigénio, ocorre também a oxidação de compostos inorgânicos, por bactérias nitrificantes autotróficas, bem como outras reações químicas. Todos estes processos contribuem para a taxa de respiração total da biomassa, contudo a respirometria é usualmente destinada a analisar somente o consumo biológico do oxigénio [41]. De tal forma que, nos ensaios de respirometria, utiliza-se aliltioreia (ATU) com o propósito de eliminar o consumo de oxigénio associado ao metabolismo das bactérias nitrificantes. A tioreia e seus derivados possuem afinidade para um

complexo de cobre, originado inibição da atividade enzimática, modificando a estrutura e o normal funcionamento da cadeia transportadora de eletrões. Quer isto dizer que a ATU inibe a conversão de amónia a nitrito. Geralmente, recorre-se à utilização de 12 mg/l de ATU, apesar de que alguns estudos tenham demonstrado que concentrações de ATU superiores a 10 mg/l podem provocar a redução da taxa de respiração. Assim, normalmente efetuam-se dois ensaios, um com amostra de lama ativada recirculada com inibidor e outro sem inibidor. A diferença entre os dois ensaios fornece a taxa de nitrificação [42].

5.1.1. Oxigénio Crítico

A taxa de respiração das lamas ativadas é um parâmetro fundamental para analisar a eficácia do tratamento biológico, uma vez que permite determinar a taxa de remoção de CBO e as necessidades de arejamento. Por sua vez, é importante salientar que a concentração de oxigénio dissolvido relaciona-se com a concentração de oxigénio crítico, isto é, com a capacidade de difusão de oxigénio na parede celular das bactérias (quando a difusão de oxigénio na parede celular das bactérias deixa de ocorrer, a biodegradação é comprometida e, consequentemente, o tratamento biológico) [35]. Deste modo, é possível obter o oxigénio crítico (concentração mínima de OD necessária para evitar que o oxigénio se torne um factor limitante no processo) recorrendo à técnica de respirometria, tendo em conta a obtenção de um efluente de qualidade e a redução dos gastos energéticos. Na prática, o valor do oxigénio crítico está compreendido entre 0,5 e 1 mg O_2/L para degradação da matéria orgânica e entre 1 e 2 mg O_2/L para nitrificação, sendo fundamental a sua determinação, uma vez que indica qual a concentração ideal de oxigénio dissolvido nos tanques de arejamento (uma concentração de OD inferior à concentração do oxigénio crítico irá reduzir a eficácia do tratamento, enquanto uma concentração OD superior acarreta custos energéticos desnecessários no fornecimento excessivo de arejamento) [43]. Assim, para determinar o oxigénio crítico (para otimização energética), procede-se à recolha de uma amostra de licor misto no fim do tanque biológico ou no início do decantador secundário (figura 22) [44].

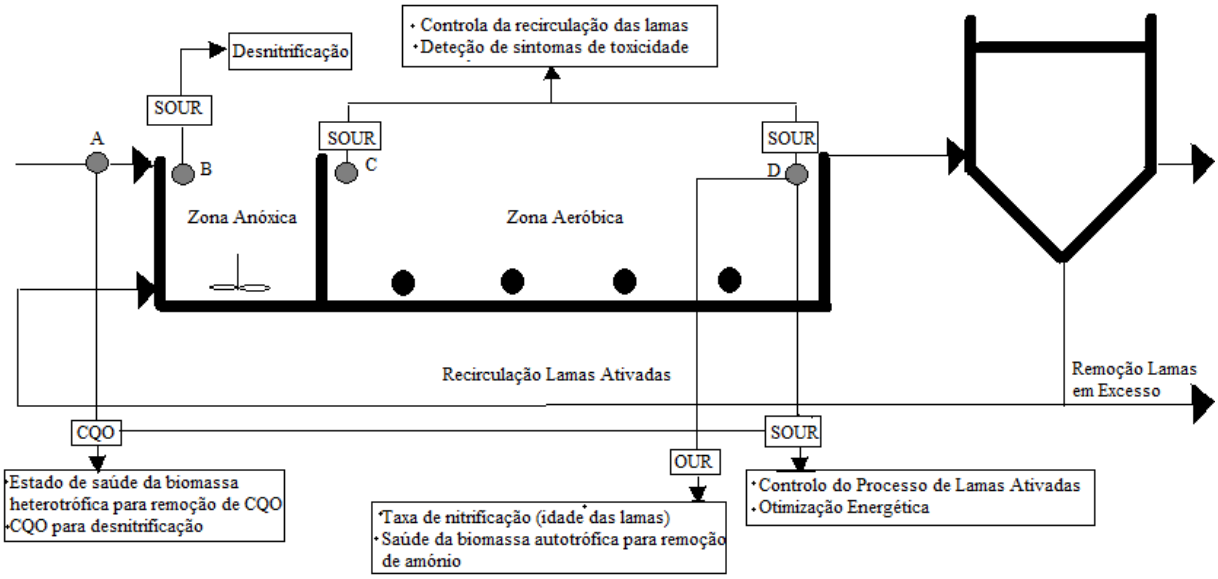


Figura 21- Principais pontos de controlo do processo de lamas ativadas (Fonte: [44]).

Após a realização do teste de respirometria e consequente obtenção da curva da concentração de oxigénio dissolvido em função do tempo, é possível determinar a concentração do oxigénio crítico

através da observação da diminuição da concentração de OD ao longo do tempo até que todo o oxigénio seja consumido. Isto é, garantindo que a disponibilidade de substrato externo não se altera durante a realização do ensaio, irá verificar-se uma taxa de consumo de oxigénio constante, desde que a concentração de OD esteja acima do valor da concentração do oxigénio crítico. Por sua vez, ao atingir a concentração crítica de oxigénio, a taxa de consumo de oxigénio começa a diminuir gradualmente, originando uma redução da inclinação da linha de concentração de OD em função do tempo. Deste modo, a figura seguinte (figura 23) mostra como é que o oxigénio crítico pode ser obtido experimentalmente [43]:

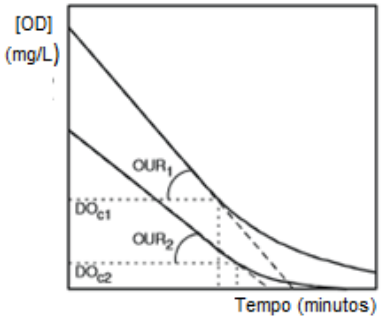


Figura 22- Representação esquemática da determinação da concentração de oxigénio crítico (Fonte: *[43]*).

Por outro lado, a partir do valor da taxa de consumo específica de oxigénio ($SOUR_{real}$) obtido através de um teste OUR, é possível estimar o oxigénio crítico de acordo com a seguinte expressão (equação 1) [44]:

$$Oxigénio\ crítico\ \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{C_L\left(\frac{mg}{L}\right) \times SOUR_{real}\left(\frac{mg}{g.h}\right)}{f \times SOUR_{média}\left(\frac{mg}{g.h}\right)} \quad (1)$$

Sendo f igual a 1,1 (valor de referência, contudo pode ser ajustado de acordo com os critérios de eficiência do projeto), C_L o valor médio de oxigénio dissolvido medido no ponto de amostragem (onde se recolheu a amostra de licor misto para o ensaio de respirometria) e a $SOUR_{média}$ obtida através do quadro seguinte (quadro 9):

Quadro 9- Valores de referência da taxa de consumo específico de oxigénio (SOUR) (Fonte: *[44]*).

Classificação do Processo	F/M	Idade das lamas (d)	SOUR (mg/g.h)	SOUR média (mg/g.h)
Carga Elevada	>0,4	4	8-20	13
Carga Média	0,2<F/M<0,4	4-10	8-18	14
Carga Baixa	0,07<F/M<0,2	10-30	2-12	7
Carga Muito Baixa (arejamento prolongado)	<0,07	10-30	2-12	7

Em que a razão F/M e a Idade das lamas são dadas pelas equações (3) e (4), respetivamente:

$$\frac{F}{M} = \frac{Q_0 S_0}{X_{v,r}.V_{reator}} \quad (2)$$

Onde Q_0 é o caudal de entrada do reator, S_0 é a concentração de CBO afluente, $X_{v/r}$ é a concentração de matéria orgânica volátil do efluente à saída do reator e V_{reator} é o volume do reator.

$$\theta_c = \frac{X_{v,r}V_{reator}}{Q_e X_{v,e} + Q_u X_{v,u}} \quad (3)$$

Onde, $X_{v,r}$ é a concentração de SSV no reator, Q_e é caudal do efluente tratado, $X_{v,e}$ é a concentração de SSV no efluente tratado, Q_u é o caudal de purga e o $X_{v,u}$ é a concentração de SSV que sai do decantador.

Importa salientar que, se o valor do $SOUR_{real}$ obtido nos ensaios for muito elevado (superior à $SOUR_{média}$ correspondente à carga elevada), significa que existe algum problema com a remoção de carbono ou nitrificação. Deste modo, é necessário realizar um ensaio de respirometria adicionando o inibidor de nitrificação ATU (numa razão de 2 mg ATU/g SSV). Se o $SOUR_{real}$ obtido for inferior ao $SOUR_{real}$ do primeiro ensaio efetuado sem a adição de ATU, então a taxa de nitrificação está muito baixa (devido à baixa concentração de oxigénio disponível) ou existe uma quantidade excessiva de amónio. Se, pelo contrário o SOUR real obtido for superior, verifica-se que há dificuldades na remoção de carbono, o que pode ser explicado pela falta de oxigénio ou pela baixa taxa de absorção de CQO (devido a más condições de operação, toxicidade ou falta de nutrientes) [44].

5.2 Caso Prático da ETAR de Sobreiras

Com vista à otimização energética do arejamento a aplicar aos tanques de lamas ativadas da ETAR de Sobreiras, foram efetuados ensaios de respirometria durante uma semana. As amostras recolhidas foram submetidas ao teste OUR, de forma a determinar a taxa de respiração da população microbiana e, posteriormente, o oxigénio crítico. Deste modo, o objetivo principal é avaliar se a quantidade de oxigénio fornecida nos tanques biológicos é a mais adequada.

5.2.1. Materiais e Métodos

Para a realização desta atividade laboratorial, utilizou-se o seguinte material:

- Respirómetro BM-Advance, Surcis S.L.;
- Computador com o software Surcis;
- Efluente da ETAR de Sobreiras;
- Lamas Ativadas;
- Proveta (1000 mL);
- Frascos Volumétricos;
- Aliltioreia (ATU).

5.2.2. Instalação Experimental

As amostras de licor misto, após terem sido recolhidas na ETAR de Sobreiras, foram transportadas numa mala térmica até à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), de forma a preservar as propriedades das mesmas durante a viagem. Deste modo, o trabalho experimental foi realizado no laboratório da ETAR da FEUP, onde está instalado o respirómetro.

5.2.3. Métodos

5.2.3.1. Determinações Analíticas

Para efetuar a atividade laboratorial, recorreu-se a um respirómetro BM-Advance, Surcis S.L, como ilustra a figura 24, que realiza os ensaios de respirometria.

Figura 23- Respirómetro BM-Advance, Surcis S.L.

Essencialmente, este equipamento permite a realização de três testes distintos:

- Teste OUR: consiste na medição da taxa de consumo de oxigénio através de apenas uma medição ou de uma série de medições:

$$OUR\left(\frac{mg\ O_2}{L.h}\right) = \frac{C_b - C_s}{t} \quad (4)$$

Em que C_b é a concentração inicial de oxigénio dissolvido (mg O_2/L), C_s é a concentração final de oxigénio dissolvido (mg O_2/L) e t é o tempo (h);

- Teste OUR cíclico: permite obter a taxa de consumo de oxigénio, através do fornecimento cíclico de oxigénio (ocorre arejamento até atingir uma determinada concentração máxima de OD estabelecida, depois para, sendo que, quando atinge a concentração mínima de OD definida o arejamento volta a funcionar, e assim sucessivamente);
- Teste R- teste de taxa de respiração dinâmica: mede continuamente a taxa de consumo de oxigénio a partir da mistura de lamas ativadas e da amostra de água residual ou composto.

Neste trabalho laboratorial, o ensaio de respirometria foi efetuado utilizando o teste OUR.

5.2.3.2. Procedimento Experimental

Para cada amostra recolhida, realizaram-se dois ensaios distintos: o primeiro utilizando o inibidor de nitrificação ATU numa razão de 2 mg ATU/g SSV (para assim analisar apenas o consumo biológico do oxigénio); e o segundo foi efetuado sem a adição do inibidor (com o propósito de distinguir a taxa de respiração da taxa de nitrificação).

Assim, para realizar o teste OUR, nas configurações do painel de controlo do respirómetro, colocou-se tudo em “on” e estabeleceu-se as seguintes condições de operação: T=20 °C, pH=7, bomba peristáltica=2 e arejamento=55.

Após carregar em aceitar e em “start”, colocou-se a amostra de 1000 mL de licor misto no respirómetro e adicionou-se o inibidor de nitrificação ATU (somente quando o valor do C_b se manteve constante e válido).

Numa primeira fase foi fornecido oxigénio recorrendo a uma bomba peristáltica e o ensaio foi efetuado com agitação e arejamento. De seguida, desligou-se o arejamento e a bomba, apenas se promovendo a agitação do efluente, de modo a proporcionar a sua homogeneização e a determinar o decaimento do consumo de oxigénio ao longo do tempo (taxa de consumo de oxigénio).

O teste foi concluído quando o oxigénio dissolvido atingiu uma concentração próxima dos 0 mg/L (tendo-se carregado no "stop"). Por último, procedeu-se ao registo dos dados através da tabela de detalhes ("details tab") ou da exportação para um ficheiro CSV.

5.2.4. Resultados e Discussão

De forma a determinar a taxa de respiração através do teste OUR de respirometria, as amostras foram recolhidas à entrada dos decantadores secundários 2 e 3 (correspondentes à saída dos tanques 1 e 2, respetivamente), com os compressores ligados, de modo a assegurar a sua homogeneização.

Seguidamente, foram realizados os ensaios de respirometria, tendo-se obtido os seguintes gráficos representativos do consumo de oxigénio dissolvido em função do tempo:

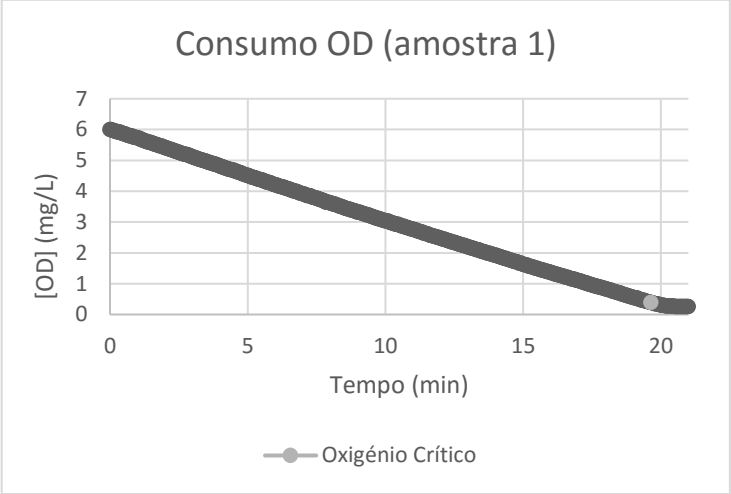


Figura 24- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 1).

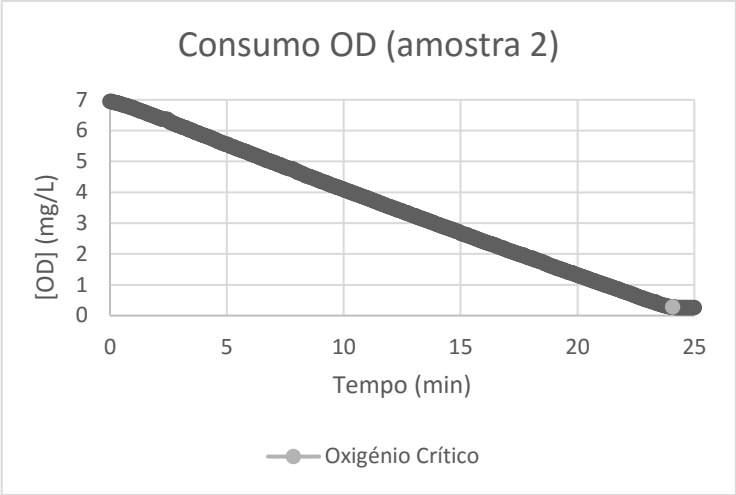


Figura 25- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 2).

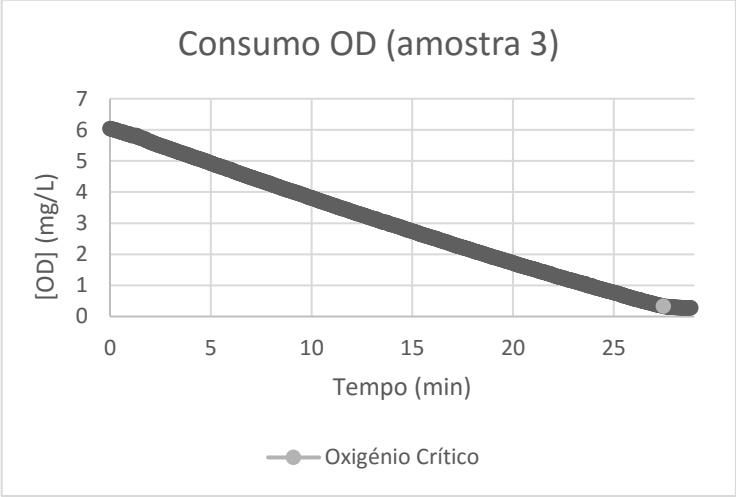


Figura 26- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 3).

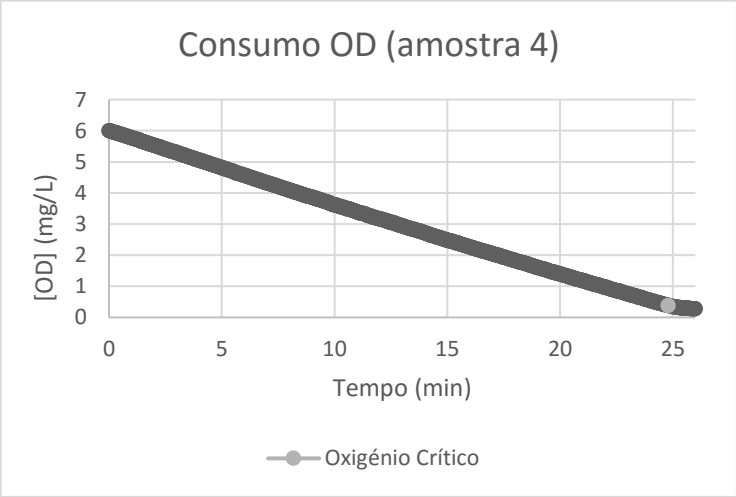


Figura 27- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 4).

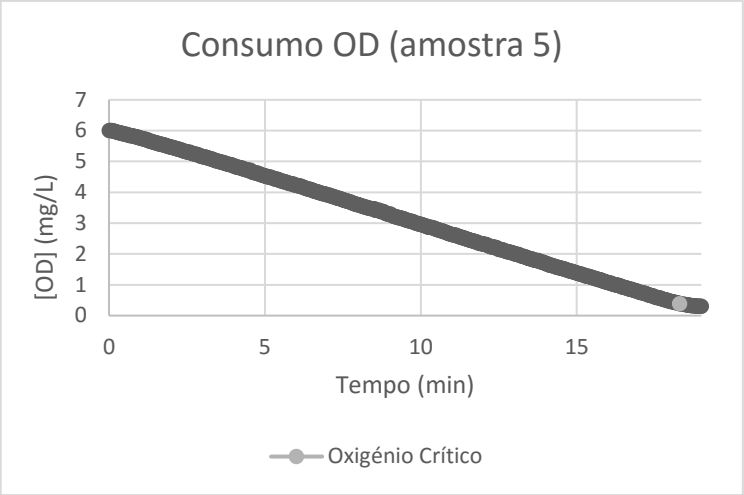


Figura 28- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 5).

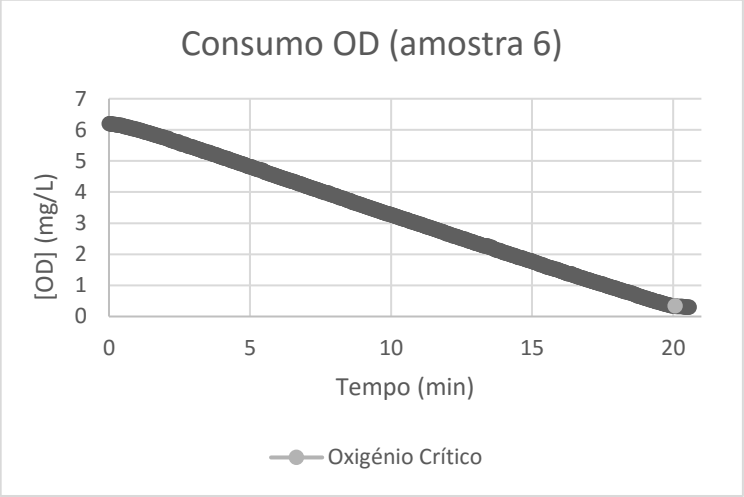


Figura 29- Representação gráfica do consumo de OD em função do tempo (amostra 6).

De seguida, através da leitura dos gráficos obtidos e dos valores de OUR fornecidos pelos testes efetuados, determinou-se graficamente os valores do oxigénio crítico, bem como a taxa de respiração e de nitrificação de cada amostra. Os resultados obtidos encontram-se expostos no seguinte quadro:

Quadro 10- Comparação do oxigénio crítico (obtido através dos ensaios de respirometria) com o oxigénio dissolvido nos tanques biológicos da ETAR de Sobreiras.

Amostra	Data	Hora	Tanque	Taxa respiração (mg/L.h)	Taxa nitrificação (mg/L.h)	OD tanque (mg/L)	O_2 Crítico (mg/L)
1	03/06/2016	13h00	1	13,77	9,13	4,5	0,40
2	03/06/2016	13h00	2	14,13	8,39	1,2	0,28
3	06/06/2016	10h15	1	9,95	8,22	2,6	0,33
4	06/06/2016	10h15	2	10,25	9,56	3,7	0,39
5	07/06/2016	9h45	1	13,92	10,88	2,5	0,39
6	07/06/2016	9h45	2	12,02	12,87	4,5	0,34

Com base nos valores obtidos (quadro 10), é possível constatar que a taxa de respiração varia entre 9,95 mg/L.h e 14,13 mg/L.h, apresentando um valor médio de 12,34 mg/L.h. Já no que diz respeito à taxa de nitrificação, esta varia entre 8,22 mg/L.h e 12,87 mg/L.h, sendo o seu valor médio igual a 9,84 mg/L.h. Estas variações podem ser explicadas, no processo de lamas ativadas, pela quantidade de sólidos existentes no efluente, uma vez que, geralmente, as taxas de consumo de oxigénio superiores estão associadas à presença de uma maior quantidade de biomassa (existem mais microrganismos a consumir O_2 para degradar a matéria orgânica). Além disso, as flutuações podem depender também de um conjunto de modificações nos tanques de arejamento, de alterações no caudal de entrada, da composição do caudal, de regulações do caudal de arejamento, de paragens prolongadas não programadas de arejamento (devido a falhas de energia), entre outros factores [35].

Já no que diz respeito ao valor mínimo necessário para a respiração endógena, isto é, ao valor do oxigénio crítico, verificou-se que este se cifra nos 0,36 mg O_2/L, variando entre 0,28 mg O_2/L e 0,40 mg O_2/L. Deste modo, constata-se que não são respeitadas as concentrações típicas referenciadas pela bibliografia (no processo de respiração para degradação da matéria orgânica, o oxigénio crítico deve estar compreendido entre 0,5 mg O_2/L e 1 mg O_2/L). Tal facto significa que o oxigénio só se torna um factor limitante no processo para concentrações de OD ainda mais baixas do que as estimadas teoricamente, pelo que a biomassa em estudo requer menos oxigénio para conseguir efetuar a degradação da matéria orgânica. Contudo, é necessário ter em conta que na ETAR de Sobreiras ocorre nitrificação, pelo que é necessário fornecer oxigénio suficiente para que este processo também possa ocorrer em condições ótimas.

Efetuando uma comparação entre os valores do oxigénio crítico obtidos através desta experiência laboratorial e as concentrações de oxigénio dissolvido nos dois tanques biológicos existentes na ETAR de Sobreiras, verificou-se que a concentração de OD é normalmente muito mais elevada do que o valor do oxigénio crítico, pelo que conclui-se que o arejamento é excessivo, acarretando maiores gastos energéticos e, consequentemente, maiores custos. Deste modo, com vista à otimização energética, é necessário adequar o funcionamento dos compressores, de forma a reduzir o arejamento e o consumo energético associado a esse equipamento, sem comprometer o tratamento biológico. Assim, sugere-se que os mesmos funcionem menos tempo. Desta forma, para obter uma maior eficácia entre a necessidade e o arejamento, pretende-se estabelecer uma concentração de OD nos tanques mais próxima do valor do oxigénio crítico e que garanta, de igual modo, que ocorra a nitrificação eficazmente. No entanto, é fundamental ter em conta os gastos de energia elétrica associados ao arranque do sistema e deve realizar-se um novo estudo para certificar-se que essa redução do arejamento não compromete o cumprimento dos parâmetros de descarga do efluente.

Por outro lado, comprovou-se que valores da taxa de respiração superiores implicam uma concentração de oxigénio crítico mais elevada. Isto pode ser explicado pelo facto de, ao existir mais biomassa, haver menores quantidades de oxigénio disponível para satisfazer as necessidades e, consequentemente, o processo requer maiores quantidades de oxigénio para permitir a respiração endógena eficaz, pelo que o valor do oxigénio crítico tem que ser superior.

É importante salientar que os resultados obtidos possuem alguma incerteza, devido a problemas operacionais, uma vez que os ensaios realizados não foram efetuados nos laboratórios da ETAR de Sobreiras, pelo que o tempo despendido no transporte das amostras até à FEUP pode ter tido alguma influência (variando de 1 a 2 horas após a recolha das amostras). Para além disso, o período de teste foi curto, pelo que, para consolidar os resultados, os ensaios devem ser realizados num período mais alargado, podendo assim avaliar-se a influência de mais fatores, como a sazonalidade, a pluviosidade, a variação das cargas poluentes afluentes, entre outros.

6
GESTÃO DE REAGENTES

O normal funcionamento das ETAR requer a utilização de reagentes na fase de exploração. Existem diversos tipos de reagentes, que variam bastante em composição (reagentes químicos, com compostos inorgânicos ou orgânicos, entre outros). O tipo de reagente utilizado e o consumo dos mesmos varia de ETAR para ETAR, de acordo com os processos de tratamento implantados nas instalações e com as caraterísticas das cargas poluentes recebidas pela estação (tipicamente, quanto maiores forem as cargas poluentes, maior será o consumo de reagentes e maior será a produção de lamas). De fato, a adição de reagentes é condicionada pelas propriedades químicas do efluente, pelo que é fundamental determinar as necessidades de reagentes para obter um tratamento eficiente. Por outro lado, verifica-se em alguns casos que não existe uma relação direta entre o caudal a tratar e o débito de reagentes, isto é, para caudais de efluente superiores, a quantidade de produtos químicos adicionada é inferior [8].

Deste modo, com o intuito de reduzir os custos de tratamento através da otimização do funcionamento e da realização de estudos de redução de consumo energético, deve proceder-se também a uma melhor gestão dos reagentes e do seu doseamento.

6.1 Consumo específico dos reagentes utilizados na ETAR de Sobreiras

Atualmente, na ETAR de Sobreiras são utilizados quatro tipos de reagentes distintos: polielectrólito (polímero); ácido sulfúrico; hipoclorito de sódio; e soda.

Quadro 11- Reagentes utilizados na ETAR de Sobreiras (Fonte: *[22]*).

Reagente	Função	Dosagem
Polímero	Obtenção de uma boa sicidade das lamas	8 kg/ton MS
Ácido Sulfúrico	Desodorização	6,8 L/d
Hipoclorito de Sódio	Desodorização	415 L/d
Soda	Desodorização	334 L/d

Devido à impossibilidade de quantificar os caudais associados às torres de lavagem e, consequentemente, o consumo específico de ácido sulfúrico, hipoclorito de sódio e de soda que está a ser verificado nos processos de desodorização da ETAR, este estudo irá abranger somente a gestão da quantidade de polímero que é adicionada (uma vez que só há registo desses valores). Assim, de seguida, procedeu-se à determinação do consumo específico de polímero na ETAR de Sobreiras.

Sabendo a quantidade de polímero que é adicionada, a quantidade de lamas desidratadas que sai da centrífuga e a sicidade das lamas, o consumo específico diário de polímero é dado por:

$$Consumo\ específico\ diário\ de\ polímero\ \left(\frac{kg}{ton\ MS}\right) = \frac{Quantidade\ de\ polímero\ adicionada\ (kg)}{Sicidade\ das\ lamas\ (\%) \times Quantidade\ de\ lamas\ desidratadas\ (ton\ MS)} \quad (5)$$

Os valores obtidos para o consumo específico de polímero para o mês de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril e Maio de 2016 estão apresentados no quadro 12, 13, 14 e 15, respetivamente.

Quadro 12- Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Janeiro de 2016).

Dia	Consumo Polímero (kg)	Sicidade (%)	Quantidade Lamas Desidratadas (kg MS)	Consumo Específico Diário de Polímero (kg/ton MS)
1	75	---	---	---
2	60	---	71800	---
3	200	---	---	---
4	125	22,3	68190	8,2
5	125	20,7	72300	8,4
6	100	21,5	---	---
7	125	23,0	41500	13,1
8	100	23,6	21020	20,2
9	100	---	42200	---
10	125	---	---	---
11	125	---	36940	---
12	150	---	57980	---
13	100	26,3	34500	11,0
14	125	28,6	18900	23,1
15	75	26,7	20000	14,0
16	125	---	43020	---
17	150	---	---	---
18	200	22,9	40340	21,7
19	100	28,6	21800	16,0
20	62,5	27,9	40100	5,6
21	75	26,9	38560	7,2
22	150	25,7	44120	13,2
23	100	---	43440	---
24	75	---	---	---
25	80	24,1	38120	8,7
26	80	26,7	56660	5,3
27	125	24,4	38640	13,3
28	75	25,7	49040	6,0
29	100	27,4	44660	8,2
30	125	---	46740	---
31	60	---	---	---
			Média	11,9

Quadro 13- Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Fevereiro de 2016).

Dia	Consumo Polímero (kg)	Sicidade (%)	Quantidade Lamas Desidratadas (kg MS)	Consumo Específico Diário de Polímero (kg/ton MS)
1	115	23,3	71800	6,9
2	100	26,4	48000	7,9
3	87	27,3	22220	14,3
4	100	23,5	41120	10,3
5	112	26,9	71180	5,8
6	130	---	39760	---
7	62	---	---	---
8	162	27,6	60000	9,8
9	130	---	42540	---
10	130	25,4	43300	11,8
11	100	24,6	41840	9,7
12	100	25,8	21100	18,4
13	100	---	47180	---
14	60	---	---	---
15	100	24,3	46900	8,8
16	125	26,2	---	---
17	100	27	39600	9,4
18	100	19,7	21800	23,3
19	75	24,9	37000	8,1
20	60	---	50700	---
21	100	---	---	---
22	80	28,4	42400	6,6
23	100	28	28320	12,6
24	100	28,3	48600	7,3
25	100	26,4	20260	18,7
26	70	24,9	50000	5,6
27	100	---	24000	---
28	100	---	---	---
29	100	26,4	44200	8,6
30	---	---	---	---
31	---	---	---	---
			Média	10,7

Quadro 14- Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Março de 2016)

Dia	Consumo Polímero (kg)	Sicidade (%)	Quantidade Lamas Desidratadas (kg MS)	Consumo Específico Diário de Polímero (kg/ton MS)
1	145	25,9	20500	27,3
2	130	27,3	49360	9,6
3	125	25,1	23050	21,6
4	125	25,7	48450	10,0
5	125	---	46200	---
6	180	---	---	---
7	125	27,1	41240	11,2
8	125	25,3	61860	8,0
9	180	27,3	68080	9,7
10	90	26,3	---	---
11	100	27,4	71120	5,1
12	100	---	46420	---
13	180	---	---	---
14	120	27,2	43440	10,2
15	150	25,8	62300	9,3
16	25	26,3	69100	1,4
17	100	26,8	19800	18,8
18	90	26,1	42280	8,2
19	150	---	40120	---
20	130	---	---	---
21	100	23,8	73540	5,7
22	90	25	70140	5,1
23	115	26	21080	21,0
24	120	25,4	55260	8,5
25	140	---	65740	---
26	140	---	42000	---
27	150	---	---	---
28	125	25,9	39980	12,1
29	125	22,7	60560	9,1
30	100	22,8	38720	11,3
31	180	24	38300	19,6
			Média	11,6

Quadro 15- Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Abril de 2016).

Dia	Consumo Polímero (kg)	Sicidade (%)	Quantidade Lamas Desidratadas (kg MS)	Consumo Específico Diário de Polímero (kg/ton MS)
1	125	25	55900	8,9
2	125	---	42300	---
3	125	---	---	---
4	125	25	59720	8,4
5	100	26,7	59900	6,3
6	135	25,7	21100	24,9
7	112	28,3	39080	10,1
8	135	26,3	39700	12,9
9	140	---	67680	---
10	90	---	---	---
11	135	19,4	62800	11,1
12	75	25,4	59300	5,0
13	160		38420	---
14	112	25,3	43880	10,1
15	100	24,4	21780	18,8
16	135	---	39320	---
17	135	---	---	---
18	150	24,5	58320	10,5
19	200	25,8	19500	39,8
20	170	25,9	61540	10,7
21	125	26,6	39400	11,9
22	150	25,6	59560	9,8
23	150	---	25200	---
24	150	---	---	---
25	125	---	47430	---
26	100	26,5	63240	6,0
27	150	26,4	57580	9,9
28	125	25,5	40940	12,0
29	150	24,8	62600	9,7
30	100	---	66360	---
31	---	---	---	---
			Média	12,5

Quadro 16- Consumo específico diário de polímero na ETAR de Sobreiras (Maio de 2016).

Dia	Consumo Polímero (kg)	Sicidade (%)	Quantidade Lamas Desidratadas (kg MS)	Consumo Específico Diário de Polímero (kg/ton MS)
1	150	---	---	---
2	150	24,4	54300	11,3
3	150	25,2	51060	11,7
4	150	24,7	75000	8,1
5	250	28,1	51480	17,3
6	150	25,8	53900	10,8
7	180	---	56760	---
8	150	---	46040	---
9	200	25,7	59840	13,0
10	175	24,4	17800	40,3
11	180	23,9	20080	37,5
12	175	23,4	40840	18,3
13	125	24	47140	11,0
14	150	---	45600	---
15	125	---	---	---
16	100	26,4	54300	7,0
17	150	28,8	48200	10,8
18	125	28,9	47400	9,1
19	125	26,1	48100	10,0
20	200	24,7	27800	29,1
21	180	---	25680	---
22	125	---	---	---
23	130	27,7	69700	6,7
24	130	27,2	67700	7,1
25	75	26,6	37320	7,6
26	150	---	---	---
27	180	27,4	55900	11,8
28	125	---	39700	---
29	125	---	---	---
30	100	27,1	63600	5,8
31	180	31,2	27400	21,1
			Média	14,5

Através da leitura dos quadros 12, 13, 14, 15 e 16, constata-se que o valor médio do consumo específico de polímero é igual a 12,2 kg/ton MS, pelo que é superior ao valor que tinha sido estabelecido teoricamente ao realizar o dimensionamento da ETAR. Deste modo, comprova-se que está a utilizar-se mais polímero do que aquele necessário para garantir uma boa sicidade das lamas, o que acarreta custos desnecessários.

Deste modo, com o intuito de reduzir a quantidade de polímero que está a ser injetada nas centrífugas, sugere-se a colocação de um caudalímetro à entrada das centrífugas, para, desta forma, controlar a dose de polímero utilizada. Além disso, deve instalar-se um software que permita registar os valores obtidos no caudalímetro e a sua visualização na sala de comando.

Por outro lado, sabe-se que o ajuste da dosagem de polímero do processo de desidratação de lamas é feito manualmente, de acordo a verificação visual do aspeto da lama que sai da centrífuga e da escorrência da lama (que deve conter poucos sólidos, garantindo uma boa separação de água e da lama). Contudo, este processo não é muito preciso, originando muitas vezes um conteúdo instável de matéria seca na lama e um consumo excessivo de polímero. Posto isto, com vista à otimização do processo de desidratação de lamas e à redução dos custos associados à utilização do reagente em questão, é proposta a implementação de um sistema de controlo em tempo real que possibilita adequar a quantidade de polímero adicionada ao teor variável de matéria seca nas lamas recebidas. Assim, deve instalar-se uma sonda Solitax sc conectada a um controlador SC1000 (que disponibiliza o teor de sólidos nas lamas recebidas em tempo real) e de um módulo RTC-SD (que ajusta a dosagem de polímero de acordo com o teor de sólidos nas lamas recebidas). Com o recurso a este sistema, prevê-se a obtenção de um conteúdo constante de matéria seca no valor desejado entre 25% e 30%, bem como a redução significativa da dosagem de polímero e dos custos associados.

7
CONCLUSÃO

As ETAR são fontes consumidoras intensivas de energia e os custos causados pela operação dessas estações constituem um problema importante para os orçamentos urbanos. Por isso, aumentar a eficiência energética e otimizar a gestão dos reagentes utilizados para assim reduzir os gastos, são hoje grandes desafios para quem trabalha no sector das águas.

O seguinte quadro sumariza as estratégias principais que podem ser adotadas pela instalação da ETAR de Sobreiras de modo a melhorar a eficiência energética (quadro 17):

Quadro 17- Medidas de racionalização dos consumos energéticos da ETAR de Sobreiras.

Sistemas de Gestão de Energia	Atualização do Sistema de Gestão de Energia, com integração de "smart-systems"
	Instalação de analisadores de energia nos principais equipamentos consumidores de energia
	Criação do cargo de gestor de energia
Sistemas de Elevação Inicial	Substituição das atuais bombas de elevação inicial por bombas equipadas com conversor de frequência
Sistema de Climatização do Edifício Administrativo	Montagem de um permutador de calor ar/água na conduta de ar do tanque biológico para aquecimento do edifício administrativo
Arejamento	Escalonamento de um único compressor para suprir as necessidades de oxigénio dos dois tanques existentes
	Operação dos compressores com um sistema de controlo Dual-Point
	Providenciar tubulações ligando a aspiração de ar do compressor a uma tomada de ar do exterior da sala de máquinas
	Limpar com mais frequência o filtro dos compressores e reparar o sistema que os mesmos possuem que avisa quando o filtro está sujo
	Estabelecer uma concentração de OD nos tanques biológicos mais próxima do valor do oxigénio crítico (0,36 mg O_2/L, em média) e que garanta, de igual modo, que ocorra a nitrificação eficazmente

Já no que diz respeito à melhoria da gestão de reagentes, sugere-se a implementação das seguintes medidas para reduzir o consumo específico de polímero (que é igual a 12,2 kg/ton MS, em média):

- Colocação de um caudalímetro à entrada das centrífugas (de modo a ser possível controlar com mais eficácia a dosagem de polímero que é adicionada) e instalação de um software que permita o registo desses valores e a sua visualização na sala de comando;
- Instalação de uma sonda Solitax sc conectada a um controlador SC1000 (que disponibiliza o teor de sólidos nas lamas recebidas em tempo real) e de um módulo RTC-SD (que ajusta a dosagem de polímero de acordo com o teor de sólidos nas lamas recebidas).

Em suma, conclui-se que existem diversas medidas que podem ser adotadas para reduzir os gastos energéticos e os custos associados ao consumo dos reagentes, sem comprometer a eficácia dos processos de tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ribeiro, A. *Aplicação da moringa oleífera no tratamento de água para consumo humano*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

[2] Mendes, S.I.S. *Valorização de lamas de tratamento de águas residuais urbanas para utilização agrícola*. Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na área de especialização em Hidraúlica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.

[3] Cheng. *Tecnologia do Processo de Lamas Ativadas*. Tecnologias e Sistemas de Tratamento de Águas II, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015

[4] EPA, U.S. *Energy Use in Wastewater Treatment Plant*.Energy Star Portfolio Manager, U.S., 2015.

[5] Halim, D. *Energy Recovery in Wastewater Treatment*. Dissertação de Mestrado, City College of New York- Department of Civil Engineering, 2012.

[6] Pinto, N.F.P. *Contributo para a minimização do consumo energético numa ETAR: estudo de diferentes proporções de lamas primárias e ativadas no processo de digestão anaeróbia*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia- Universidade de Lisboa, 2015.

[7] Peeters, J., Vicevic, G. e Koops, H. *The role of innovative technologies in achieving energy neutral wastewater treatment*. International Water Association Congress 4-6, 2014.

[8] Rego, R.R. *Análise do desempenho de Estações de Tratamento de Águas Residuais recorrendo a um modelo de metabolismo*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico- Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

[9] Sousa, J.P. *Caracterização da Decantabilidade das Lamas Ativadas da ETAR de Sobreiras*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

[10] López, E., Guzman, M. e Baizabal, J. *Coagulation-flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta potential measurements*, 1-10, Journal of hazardous materials 279C, 2014.

[11] Topare, N., Attar, S. e Manfe, M. *Sewage/wastewater treatment technologies: a review*, 18-24, Scientific Reviews & Chemical Communications 1, 2011.

[12] Metcalf, E. *Wastewater Engineering- Treatment Disposal Reuse*, International Editions: McGraw-Hill, 1991.

[13] Gray, N. *Wastewater Biology of Wastewater Treatment*, Series on Environmental Science and Manegement- Vol. 4., Ireland, 2004.

[14] AGDA. *Tratamento de Águas Residuais*. http://www.agda.pt/tratamento-de-aguas-residuais.html. 2016.

[15] Duarte, E. *Manual de Apoio às Aulas Teóricas da Unidade Curricular de Tratamento de Águas, Efluentes e Resíduos*, 1-171, Universidade Técnica de Lisboa- Instituto Superior de Agronomia, 2011.

[16] Cristóvão, R., Botelho C., Martins, R., Loureiro, J. e Boaventura, R. *Primary Treatment Optimization of a Fish Canning Wastewater from a Portuguese Plant*, 1-13, Water Resources and Industry, 2014.

[17] Sonune, A., Ghate, R. *Developments in Wastewater Treatment Methods*, 55-63, Desalination, 2004.

[18] Harleman, D., Murcott, S. *An Innovative Approach to Urban Wastewater Treatment in the Developing World*, 1-11, International Water Association Congress, 2014.

[19] Mendes, S. *Valorização de Lamas de Tratamento de Águas Residuais Urbanas para Utilização Agrícola*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.

[20] Santos, J. *Metodologia de Tratamento de Lamas e Organização do Balanço de Massas.* Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Hidráulica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.

[21] Online. *ETAR de Sobreiras a funcionar a 100% no final de Julho.* http://www.ambienteonline.pt/canal/detalhe/2765. 2005.

[22] Degrémont. *ETAR de Sobreiras (Portugal).* http://www.degremont.pt/pt/index.php/diseno-y-construccion/edar-dyc-ref/251-etar-de-sobreiras-portugal.html#suez-env-home-resource. 2016.

[23] JPN. *Praias do Porto: ETAR de Sobreiras sobrecarregada*. http://jpn.up.pt/2007/07/04/praias-do-porto-etar-de-sobreiras-sobrecarregada/. 2007.

[24] AdP (Águas do Porto). *ETAR de Sobreiras*. http://www.aguasdoporto.pt/. 2016.

[25] SMAS. *Descrição de Funcionamento da ETAR de Sobreiras*, Porto: Ondeo- Degrémont. 2001.

[26] Menendez, M., Black, P. *Developments How We Use Energy at Wastewater Plants and How We Can Use Less, NC AWWA-WEA 90th Annual Conference*, 2010.

[27] INEGI. *Auditoria Energética às Instalações e Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREN 2014-2019) da ETAR de Sobreiras*, Porto, 2015.

[28] ADENE. *Gestão de Energia- Auditoria Energética*. http://www.adene.pt/textofaqs/auditoria-energetica. 2016.

[29] Brito, A., Melo, L. *A Simplified Analisys of Reaction and Mass Transfer in UASB and EGSB*, 35-44, Environmental Technology- vol. 18, 1997.

[30] Daw, J., Hallett, K., DeWolfe, J. e Venner, I. *Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities*, US National Renewable Energy Laboratory, 2012.

[31] Santos, A., Paiva, P., Teixeira, J., Brito, A., Coelho, L. e Nogueira, R. *Coagulant Properties of Moringa Oleifera Protein Preparations: Application to Humic Acid Removal*, Environmental Technology 33, 2012.

[32] Deines, A. *Energy Production and Efficiency at Wastewater Treatment Plants*. Water Environment Research Foundation, 2011.

[33] Bolles, A. Modeling Wastewater Aeration Systems to Discover Energy Savings Opportunities, Process Energy Services LLC, 1998.

[34] Kungols, A., Peristeridis, G., Halatzoglou A., Samaras, P. e Sakellaropoulus G. Toxicity Characterization of Influents and Effluentes in Wastewater Treatment Plant, 1998.

[35] Pinheiro, M. *Utilização do Strathtox como Método Respirometrico na Optimização de Processo de uma ETAR.* Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal- Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, 2012.

[36] Petersen, B., Gernarey, K., Ottoy, J. e Vanrolleghem, P. *Application of Biosensors in Wastewater Treatment*, 1999.

[37] Diamond, K., Mason, G. e Daldowie S. *Energy Optimization Programme Report*, 2011.

[38] Spangers, H., Vanrolleghem, P., Nguyen, K., Vanhooren, H. e Patry, G. *Towards a Simulation-Benchmark for Evaluating Respirometry- Based Control Strategies*, 219-226, Water Science Technologies, 1998.

[39] Deus, G. *Automação de um Sistema de Respirometria*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico- Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

[40] Vanrolleghem, P. *Principles of Respirometry in Activated Sludge Wastewater Treatment*, Belgium Department of Applied Mathematics, Biometrics and Process Control- Universiteit Gent, 2002.

[41] Spangers, H., Vanrolleghem, P., Olsson, G. e Dold, P. *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process: Principles*, Scientific and Technical Report No. 7, London, UK: IAWQ, 1998.

[42] Hagman, M., Jansen, J. *Oxygen Uptake Rate Measurements for Apllication at Wastewater Treatment Plants*, 131-138, Vatten 63, 2007.

[43] Lubbe, J., Haandel, A. *Handbook Biological Wastewater Treatment- Designs and Optimisation of Activated Sludge Systems*, Uitgeverij Quist, 2007.

[44] Surcis, *BM- Advance Respirometer: Operation Manual*, 2015.

[45] Inman, D. *Comparative Studies of Alternative Anaerobic Digestion Technologies*. Dissertação para obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004..

[46] Eletrobrás. *Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido- Manual Prático*, Procel Indústria, 2002.