



**Adriana Filipa  
Oliveira Sousa**

**Otimização do funcionamento do sistema de  
arejamento da ETAR de Ílhavo da AdCL**





**Adriana Filipa  
Oliveira Sousa**

**Otimização do funcionamento do sistema de  
arejamento da ETAR de Ílhavo da AdCL**

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela, Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

Presidente

Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Arguente

Engenheiro Fausto Manuel Melo de Oliveira

Especialista

Orientadora

Professora Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela

Professora Associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

No final deste relatório torna-se imprescindível agradecer:

À Universidade de Aveiro, aos meus professores e orientadora, por todos estes anos de formação, aprendizagem e transmissão de valores e conhecimento.

Ao engenheiro Milton Fontes pela oportunidade presenteada, pela partilha de conhecimento, pela disponibilidade, por toda a ajuda que prestou no decorrer do estágio e por ter sempre as soluções para ultrapassar os problemas.

À Magda, à Joana, à Paula, ao Zé e ao Bruno pelo companheirismo, camaradagem, boleias e por me terem feito sentir sempre integrada. E a toda a restante equipa da ETAR de Ílhavo que me acompanhou ao longo de vários meses, me fez sorrir e me proporcionou um excelente ambiente de trabalho.

A todos os colaboradores do Modelo que me fizeram crescer e adquirir valores e me incentivaram e ensinaram a ser persistente e lutadora quer a nível profissional quer a nível pessoal.

Aos meus amigos, que me acompanharam ao longo destes anos, e em especial ao meu grupo maravilha, que tornaram esta caminhada mais fácil! Foi com vocês que conheci o espírito académico e com quem aprendi a trabalhar verdadeiramente em equipa.

Às minhas “amigas de Ovar”: Cláudia, Sara e Cristiana por toda a amizade ao longo destes anos.

A todas as minhas colegas de casa, especialmente à minha irmã, Cátia, Nádia, Sara e Rita por todas as noites de conversa, refeições, brincadeiras e amizade.

Aos meus pais e irmãos pelo acompanhamento não só nesta fase mas ao longo de toda a vida.

Ao Rafael, por todo o apoio e incentivo prestados durante todo o curso e por nunca me ter deixado fugir dos meus sonhos.



**palavras-chave**

Águas residuais, ETAR, lamas ativadas, otimização energética, tratamento biológico

**resumo**

O presente relatório de estágio é o produto do estágio curricular realizado na ETAR de Ílhavo da AdCL, S.A., que teve três objetivos específicos, nomeadamente: análise do funcionamento do tratamento biológico por lamas ativadas; análise do funcionamento do sistema de arejamento através do seu algoritmo e possível proposta de alteração tendo em vista a sua otimização; e estudo dos consumos energéticos do tratamento biológico e das turbinas utilizadas para arejamento.

Em primeiro lugar, apurou-se que a ETAR está a tratar um caudal médio de 57% do horizonte de projeto (2018). Em termos de carga, está a tratar 81% do horizonte de projeto.

A nível do tratamento secundário, a ETAR alcança uma remoção média anual de 85 % em SST, 88% em CQO e 94 % em CBO<sub>5</sub>. A análise dos parâmetros operacionais permitiu concluir que a ETAR opera em média carga com um escoamento hidráulico PFR e CSTR. O tratamento na ETAR mostrou-se eficiente, sendo que maioritariamente, durante 2015, cumpriu os limites dos requisitos legais para o CQO, CBO<sub>5</sub> e SST constantes da licença de descarga de águas residuais. No que diz respeito aos parâmetros de dimensionamento, todos os valores encontraram-se dentro das gamas recomendadas pela bibliografia para um sistema de média carga, à exceção dos SST no tanque de arejamento, que se encontravam um pouco elevados.

Do trabalho desenvolvido concluiu-se que o algoritmo do sistema de arejamento possuía algumas limitações, tendo então sido elaborados dois novos, considerando o funcionamento das turbinas com e sem variador de frequência. Além disso foi desenvolvida uma nota técnica que facilitasse a compreensão e operação do sistema de arejamento.

No que diz respeito à energia associada ao tratamento secundário, verificou-se que representa 78 % dos consumos energéticos totais existentes na ETAR, e que o consumo associado às turbinas representa 60,1 % dos consumos no tratamento secundário e, portanto, 47,0 % dos consumos energéticos totais na ETAR.

Por último, foi realizada uma campanha de amostragem nos dias 25 e 26 de junho de 2016 na seção A1 do tanque de arejamento, o que permitiu validar alguns pressupostos dos novos algoritmos e concluir que a turbina 1 apresentou um fator de carga de 66% e a turbina 2 de 91 %. A utilização de variadores de frequência implicou uma menor oscilação na energia consumida, eliminando assim picos de consumo. Além disso, verificou-se uma redução da energia consumida no funcionamento das turbinas entre 5 % a 20 %.



**keywords**

wastewater, WWTP, activated sludge, energy optimization, biological treatment

**abstract**

The present internship report is the product of a curricular traineeship at the Ílhavo Wastewater Treatment Plant (WWTP) of AdCL, S.A., having found three specific objectives: analysis of the functioning of the activated sludge system; analysis of the functioning of the aeration system through its algorithm and possible proposal of alteration with view to its optimization; and a study of energy consumption in secondary treatment and turbines.

Firstly, it was revealed that the WWTP appears to be oversized for current needs with an average flow rate of 57% of what was projected for 2018. In terms of load, in 2015, Ílhavo WWTP treat 80 % of what was project.

In terms of secondary treatment, the WWTP reaches an average annual removal of 85% in TSS, 88% in COD and 94 % in BOD<sub>5</sub>. The analysis of the operational parameters allowed to conclude that the WWTP operates on average load and the biological system resembles a mixed system (plug-flow and complete mix) with tapered aeration. The treatment of WTTTP was found to be efficient whereby, for the most part during 2015, it complied with the limits of legal requirements imposed for the discharge of wastewater. With the exception of TSS's which were found to be slightly elevated, the remaining parameters were within the range recommended by the bibliography.

It was concluded that the algorithm of the aeration system had some flaws leading to the elaboration of two new ones for the turbines, with and without frequency variator. In addition, a technical note was developed to facilitate the comprehension and operation of the aeration system.

Furthermore, there was a verification of the energy associated to the secondary treatment representing 78% of the existing energy consumption in the WWTP and the consumption associated to the turbines representing 60,1% of the secondary treatment and therefore, 47.0% of the energy expenses in the WWTP.

Finally, a sampling campaign was carried out on the 25th and 26th of June in section A1 of the aeration tank. This allowed the validation of some assumptions of the new algorithm and the conclusion that turbine 1 presents a yield of 66% and turbine 2 of 91%. The use of frequency variators implied a lower oscillation in the energy consumed, eliminating consumption peaks. In addition, there was a reduction of the energy consumed between 5% and 20%



---

## Índice

1	Introdução.....	7
1.1	Enquadramento.....	7
1.2	Objetivos .....	7
2	Fundamentos teóricos .....	9
2.1	Águas residuais.....	9
2.1.1	Características das águas residuais.....	9
2.1.2	Tratamento das águas residuais .....	11
2.2	Tratamento Secundário .....	12
2.3	Sistemas de lamas ativadas .....	13
2.3.1	Descrição do processo .....	13
2.3.2	Parâmetros que influenciam o tratamento e parâmetros operatórios .....	17
2.3.3	Sistema de arejamento.....	21
2.3.5	Gamas típicas para os processos de lamas ativadas mais comuns.....	24
2.4	Gestão energética nas ETAR .....	25
2.4.1	Otimização da ETAR .....	27
2.4.2	Tratamento biológico – Consumo energético.....	30
2.4.3	Equipamentos de arejamento.....	32
2.4.4	Variadores de frequência .....	33
3	Estágio.....	35
3.1	Apresentação da empresa.....	35
3.2	Apresentação do caso de estudo - ETAR de Ílhavo.....	38
3.2.1	Processo de tratamento da água residual.....	39
4	Metodologia .....	47
4.1	Avaliação do funcionamento do sistema de lamas ativadas .....	47
4.1.1	Análise da eficiência do tratamento secundário da ETAR .....	48
4.1.2	Análise dos parâmetros operacionais do sistema de lamas ativadas.....	49
4.1.3	Cumprimento dos VLE da licença para rejeição de águas residuais .....	51
4.2	Análise do funcionamento do sistema de arejamento das lamas ativadas .....	51
4.2.1	Análise do funcionamento do sistema de arejamento.....	52
4.2.2	Proposta de alteração do algoritmo.....	54
4.2.3	Desenvolvimento de uma nota técnica.....	55
4.3	Análise energética do tratamento secundário .....	55
4.3.1	Estudo dos consumos no tratamento secundário .....	56
4.3.2	Estudo dos consumos nas turbinas.....	57
4.3.3	Estudo do funcionamento das turbinas – Campanha de amostragem .....	59
5	Resultados.....	63
5.1	Análise do funcionamento do sistema de lamas ativadas .....	63

5.1.1	Avaliação da eficiência de tratamento.....	63
5.1.2	Análise dos parâmetros operacionais .....	64
5.1.3	Cumprimento dos requisitos legais .....	76
5.2	Análise do funcionamento do sistema de arejamento das lamas ativadas .....	79
5.2.1	Análise do funcionamento do sistema de arejamento.....	79
5.2.2	Proposta de alteração do algoritmo.....	86
5.2.3	Nota técnica sobre o funcionamento do sistema de arejamento .....	92
5.3	Estudo energético do sistema de arejamento.....	92
5.3.1	Energia consumida no tratamento secundário .....	92
5.3.2	Estudo energético do funcionamento das turbinas – Campanha de amostragem ....	98
6	Conclusões .....	105
7	Bibliografia .....	111
8	Anexos .....	115

---

## Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema dos processos biológicos mais utilizados. Adaptado de [4] .....	12
Figura 2 - Esquemática do processo de lamas ativadas. Adaptado de [4].....	16
Figura 3 – Evolução dos grupos de microrganismos em função da idade da lama (CANLER, PERRET, DUCHÈNE, & COTTEUX, 1999).....	20
Figura 4 – Equipamentos para arejamento. Adaptado de [19] .....	23
Figura 5 - Comparação qualitativa dos custos energéticos em diferentes órgãos numa ETAR. Adaptado de [3].....	26
Figura 6 – Categorias de respostas aos problemas no aumento da eficiência numa ETAR .....	28
Figura 7 – Distribuição energética usada numa ETAR convencional [4].....	30
Figura 8 – Requisitos energéticos do sistema de lamas ativadas ( $\text{mgd} \times 3785 = \text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ). Adaptado de [2].....	31
Figura 9 – Oxigénio dissolvido no licor misto vs energia requerida ( $\text{hp-hr/lb DO} \times 5.919 = \text{MJ/kg}$ ). Adaptado de [2] .....	32
Figura 10 – Comparação do consumo de energia de sistemas de controlo manuais com variadores de frequência [36].....	34
Figura 11 - Zonas de abrangência do abastecimento de água .....	36
Figura 12 - Zonas de abrangência do saneamento de água .....	37
Figura 13 – Localização da ETAR de Ílhavo. Fonte: Google Maps .....	38
Figura 14 – Diagrama funcional da ETAR de Ílhavo.....	39
Figura 15 - Esquema das turbinas do tanque de arejamento.....	42
Figura 16 – Parâmetros de controlo do oxigénio dissolvido .....	53
Figura 17 – Aspeto do programa de monitorização do sistema de arejamento .....	54
Figura 18 – Analisador de energia do tratamento secundário .....	57
Figura 19 – Pinça digital (digital clamp multimeters).....	58
Figura 20 – Analisador de energia El Control Energy net.....	59
Figura 21 – Analisador de energia Metrel MI 2892 .....	59
Figura 22 - Montagem experimental .....	60
Figura 23 – Eficiência de remoção do SST, CQO e $\text{CBO}_5$ das águas residuais durante o tratamento .....	63
Figura 24 - Caudal tratado na ETAR e precipitação, no ano 2015.....	64
Figura 25 – Carga orgânica mássica durante o ano de 2015.....	65
Figura 26 – Carga orgânica volúmica, durante o ano de 2015.....	66
Figura 27 – Concentração de sólidos suspensos totais e voláteis no reator biológico durante o ano 2015.....	67
Figura 28 - Tempo de retenção de hidráulico o ano de 2015 .....	68
Figura 29 – Idade das lamas no tanque de arejamento, durante o ano de 2015.....	69
Figura 30 – Concentração de oxigénio dissolvido no tanque A.....	72

Figura 31 – Tempo de funcionamento das turbinas e OD da secção A1 do tanque biológico .....	72
Figura 32 – Tempo de funcionamento das turbinas e OD da secção A2 do tanque biológico .....	73
Figura 33 - Concentração de oxigénio dissolvido no tanque B.....	74
Figura 34 – Tempo funcionamento das turbinas e OD da secção B1 do tanque biológico B .....	74
Figura 35 – Tempo funcionamento das turbinas e OD da secção B1 do tanque biológico .....	75
Figura 36 – Índice volumétrico de lamas durante o ano 2015 .....	76
Figura 37 – Sólidos suspensos totais à saída da ETAR, durante o ano 2015.....	77
Figura 38 - Carência química de oxigénio à saída da ETAR, durante o ano 2015.....	77
Figura 39 - Carência bioquímica de oxigénio à saída da ETAR, durante o ano 2015.....	78
Figura 40 - Diagrama do funcionamento das turbinas do sistema de arejamento .....	81
Figura 41 – Resultados do teste 1 .....	83
Figura 42 – Resultados do teste 2 .....	84
Figura 43 – Resultados do teste 3 .....	85
Figura 44 – Algoritmo de funcionamento das turbinas sem variador de velocidade .....	88
Figura 45 - Algoritmo de funcionamento das turbinas com variador de velocidade .....	91
Figura 46 – Energia consumida no tratamento secundário, durante o ano de 2015 .....	93
Figura 47 – Indicador de energia consumida no tratamento secundário por total de energia consumida na ETAR.....	94
Figura 48 – Consumo energético das turbinas [kWh/mês] .....	96
Figura 49 – Percentagem de energia consumida pelas turbinas no tratamento secundário e na ETAR .....	97
Figura 50 - Custo total associado às turbinas durante o ano 2015.....	97
Figura 51 – Variação do oxigénio dissolvido para o dia 25 de Junho.....	99
Figura 52 - Variação do oxigénio dissolvido para o dia 26 de Junho .....	100
Figura 53 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigénio, entre as 0 e 8h	101
Figura 54 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigénio, entre as 8 e 16h .....	101
Figura 55 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigénio, entre as 16 e 0h .....	102
Figura 56 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 0 e 8h .....	103
Figura 57 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 8 e 16h .....	103
Figura 58 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 16 e 0h .....	104

---

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Relação entre o oxigénio fornecido e as necessidades de oxigénio para cada sistema .....	15
Tabela 2 – Classificação dos microrganismos de acordo com a sua temperatura ótima de crescimento[16] .....	17
Tabela 3 – Valores típicos para a carga orgânica mássica e tempo de retenção hidráulico [4] .....	19
Tabela 4 – Gamas típicas para os processos de lamas ativadas mais comuns [1] .....	25
Tabela 5 – Histórico até à criação da AdCL.....	38
Tabela 6 – Valores limite de emissão na descarga de águas residuais (Licença de utilização dos recursos hídricos – rejeição de águas residuais).....	45
Tabela 7 - Parâmetros analisados no funcionamento do sistema de lamas ativadas.....	48
Tabela 8 – Parâmetros analisados para o estudo do funcionamento do sistema de arejamento... ..	52
Tabela 9 – Alterações efetuadas ao tempo de funcionamento das turbinas .....	54
Tabela 10 – Parâmetros para o estudo do funcionamento energético .....	56
Tabela 11 – Volumes de lamas em excesso .....	69
Tabela 12 - Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 1 .....	82
Tabela 13 – Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 2 .....	84
Tabela 14 - Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 3 .....	85
Tabela 15 – Parâmetros medidos para estimar o consumo .....	95
Tabela 16 - Potência ativa [kWh/mês] estimada para as turbinas.....	96
Tabela 17 – Parâmetros de descarga da água residual .....	98

## Lista de abreviaturas

A/M – Razão alimento/microrganismo;  
CBO<sub>5</sub> – Carência bioquímica de oxigénio (5 dias);  
CH<sub>4</sub> – Metano;  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono;  
CQO – Carência química de oxigénio;  
DAF – *Dissolved air flotation*;  
EE – Estação elevatória;  
ETAR – Estação de tratamento de águas residuais;  
ISO – International Standard Organization;  
IVL – Índice volumétrico de lamas;  
MLVSS – Quantidade de biomassa contida no reator;  
NO<sub>2</sub> – Dióxido de azoto;  
OD – Oxigénio dissolvido;  
Q<sub>0</sub> – Caudal influente;  
Q<sub>e</sub> – Caudal efluente;  
Q<sub>r</sub> – Caudal de recirculação de lamas;  
Q<sub>w</sub> – Caudal de remoção de lamas;  
S<sub>0</sub> – Concentração de substrato no influente;  
S<sub>e</sub> – Concentração de substrato no efluente;  
S<sub>r</sub> – Concentração de substrato na recirculação de lamas;  
SS – Sólidos Suspensos;  
S<sub>w</sub> – Concentração de SSV na purga de lamas;  
TRS – Tempo de retenção de sólidos;  
V – Volume útil do tanque de arejamento;  
X – Concentração de SSV no tanque de arejamento;  
X<sub>0</sub> – Concentração de SSV no influente;  
X<sub>e</sub> – Concentração de SSV no efluente;  
X<sub>r</sub> – Concentração de SSV na recirculação de lamas;

---

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO

Um dos maiores desafios do setor das águas residuais é aliar o *design* ideal a um eficiente processo de tratamento mantendo o investimento e o custo operacional o mais baixo possível e garantindo o cumprimento dos critérios de qualidade para a descarga de águas residuais [1].

A ETAR de Ílhavo é certificada pela norma ISO 50001 que é uma norma internacional para a gestão energética e, abrangida pelo Plano de Racionalização dos Consumos de Energia. Por estes motivos, a redução dos custos associados ao consumo de energia é uma prioridade na ETAR

Normalmente numa ETAR convencional, o processo que envolve o maior consumo energético é o tratamento biológico por sistema de lamas ativadas que requer energia para o arejamento bem como para o bombeamento e recirculação do efluente [2]–[4]. Por este motivo, o sistema de lamas ativadas torna-se a primeira escolha a ser considerada numa medida gestão de energia

A otimização de uma ETAR pode ser conseguida através da modificação de operações existentes com a finalidade de melhorar uma operação, manutenção ou desempenho ou pela adição de novos componentes que aumentem a eficiência do tratamento [3].

## 1.2 OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido teve como objetivo a otimização do funcionamento do sistema de arejamento da ETAR de Ílhavo, e foi realizado no âmbito de um estágio curricular realizado na ETAR de Ílhavo, pertencente à empresa Águas do Centro Litoral, S.A. Os objetivos específicos do estágio são:

1 – Análise do funcionamento do sistema de tratamento biológico por lamas ativadas;

2 – Análise do funcionamento do sistema de arejamento do tratamento por lamas ativadas através do estudo do seu algoritmo e possível proposta de alteração, tendo em vista a sua otimização;

3 – Estudo energético referente ao tratamento secundário e, especificamente, das turbinas utilizadas para o arejamento deste sistema.

---

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 ÁGUAS RESIDUAIS

As atividades antrópicas geram resíduos que podem assumir natureza sólida, líquida ou ainda sob forma de emissões gasosas. Aqueles que são de natureza líquida, também conhecidos como efluentes líquidos ou águas residuais definem-se como uma combinação de resíduos transportados na água. Estes efluentes líquidos podem ser provenientes de residências, empresas, cidades, indústrias e agricultura, podendo ainda, ter um acréscimo proveniente de águas superficiais e pluviais [3].

Quando não tratada, as águas residuais podem tornar-se numa ameaça ao ambiente e à saúde pública. O seu tratamento evidencia-se como uma necessidade para o desenvolvimento sustentável, essencial ao bem-estar geral, à saúde humana, à segurança das populações, às atividades económicas e à proteção do ambiente [5], [6].

Uma ETAR engloba um conjunto de operações e processos físicos, químicos e biológicos com vista ao tratamento das águas residuais, utilizando para tal unidades devidamente projetadas, cuja finalidade seja obter um efluente final de qualidade. O tipo de processos a serem utilizados depende da natureza e características da água residual, dos objetivos de qualidade, do meio recetor e da diluição disponível [3].

#### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS RESIDUAIS

Com a implementação de requisitos legais cada vez mais restritos para a descarga de águas residuais, tornou-se fundamental o conhecimento das suas características para o desenvolvimento, combinação e aplicação de tecnologias capazes de remover sólidos, matéria orgânica, nutrientes e possíveis agentes patogénicos das águas residuais [7].

A compreensão destas características é crucial para o dimensionamento, operação e gestão da recolha e tratamento das águas residuais. As águas residuais são caracterizadas em termos de composição física, química e biológica [8].

#### 2.1.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

As características físicas incluem: o teor de sólidos, a temperatura, o tamanho das partículas, a turbidez, a cor, o odor, a transmitância, a condutividade, a densidade e o peso específico [3].

A temperatura e o teor de sólidos são os fatores mais importantes no tratamento de águas residuais. A temperatura afeta as reações químicas, a atividade biológica e a concentração de gases dissolvidos. Já os sólidos que constituem a matéria suspensa e dissolvida na água, condicionam a operação e dimensionamento das unidades de tratamento [3].

#### 2.1.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Os constituintes químicos da água residual são usualmente divididos em orgânicos e inorgânicos. A matéria orgânica compreende hidratos de carbono, gorduras, óleos, proteínas, pesticidas, compostos orgânicos voláteis e químicos tóxicos, entre outros. Relativamente aos inorgânicos incluem por exemplo metais pesados, nutrientes como azoto e o fósforo, cloretos e enxofre. Alguns gases como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) ou metano ( $\text{CH}_4$ ) podem encontrar-se dissolvidos nas águas residuais [3].

Devido ao facto da água residual apresentar uma grande variedade de compostos orgânicos, a determinação exclusiva de um dos compostos compreende a utilização de instrumentação específica bastante eficiente, capaz de medir concentrações praticamente residuais [3]. Quando se pretende uma análise conjunta, isto é, quando o objetivo é quantificar vários constituintes orgânicos é geralmente determinado a carência bioquímica de oxigénio a 5 dias ( $\text{CBO}_5$ ), a carência química de oxigénio (CQO) e o carbono orgânico total (COT) [8].

A  $\text{CBO}_5$  quantifica o oxigénio necessário para a oxidação, por via biológica, da matéria orgânica durante 5 dias, a  $20^\circ\text{C}$ . A CQO mede a quantidade de oxigénio necessário para que através da oxidação química, um agente oxidante forte seja capaz de oxidar determinados compostos [3].

---

### 2.1.1.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

O conhecimento das características biológicas das águas residuais assumem uma clara importância. Por um lado, para o controlo de doenças causadas por organismos patogénicos de origem humana. Por outro lado, as bactérias e outros microrganismos desempenham funções fundamentais para a decomposição e estabilização da matéria orgânica tanto na natureza como nas ETAR. Os microrganismos encontrados nas águas residuais incluem bactérias, fungos, algas, protozoários, vírus e outros seres microscópicos [3].

### 2.1.2 TRATAMENTO DAS ÁGUAS RESIDUAIS

Os sistemas hídricos têm uma capacidade natural de purificação na medida em que conseguem remover contaminantes presentes nas águas, bem como matéria orgânica, sólidos e até químicos tóxicos. No entanto, este processo é lento e limitado no que respeita a cargas elevadas de poluentes [9]. Deste modo, cresce a necessidade de remover os poluentes, para que a água residual possa ser descarregada no meio hídrico sem qualquer efeito adverso relevante [10].

As ETAR assumem um papel fundamental no tratamento de águas residuais de diversas composições, através de diferentes tipos de operações e processos, permitindo a devolução ao meio ambiente com segurança e de acordo com as exigências legais em vigor [11].

Os sistemas convencionais de tratamento de água residual resultam da combinação de processos químicos, físicos e biológicos para remover impurezas. Na fase líquida, de um modo geral, este tratamento pode ser dividido em 4 fases:

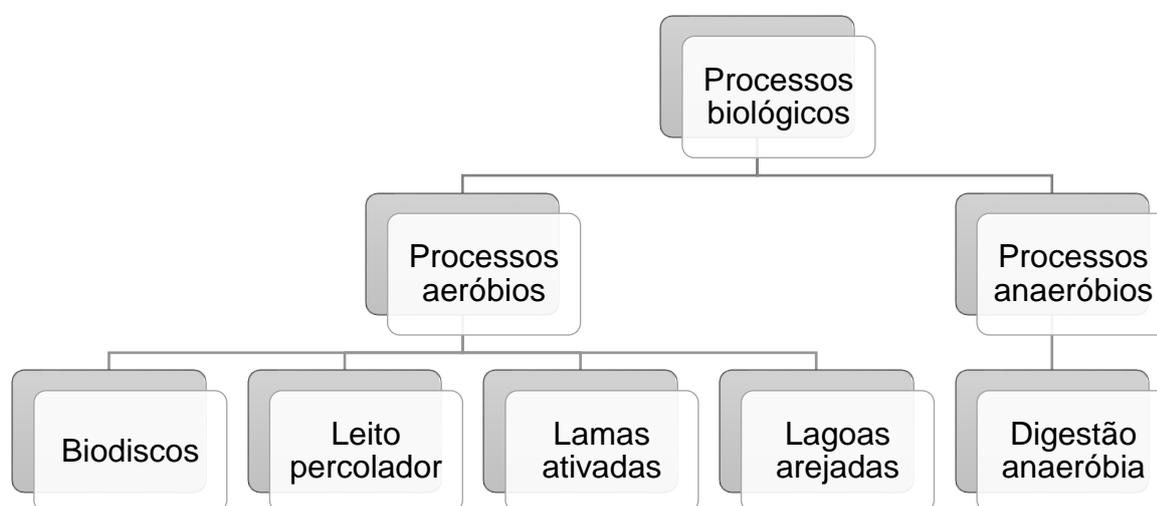
- Tratamento preliminar - consiste num conjunto de operações físicas para remover materiais mais grosseiros da água residual;
- Tratamento primário – é constituído por processos físicos e/ou químicos de modo a remover os sólidos facilmente sedimentáveis;
- Tratamento secundário – constituído por processos biológicos cuja finalidade é remover matéria orgânica biodegradável;
- Tratamento terciário – é facultativo. Complementa as etapas anteriores aperfeiçoando a qualidade da água tratada.

Paralelamente ao tratamento da componente líquida, a componente sólida constituída pelas lamas é igualmente tratada e encaminhada para um destino adequado. O tratamento da fase sólida compreende os seguintes processos:

- Espessamento – tem o objetivo de remover água das lamas para reduzir o seu volume;
- Digestão anaeróbia - processo anaeróbio que reduz a matéria volátil e do qual resulta o biogás;
- Desidratação – permite remover a humidade das lamas, reduzindo os custos associados ao seu destino final [3].

## 2.2 TRATAMENTO SECUNDÁRIO

O tratamento secundário, também conhecido por tratamento biológico de águas residuais é realizado por bactérias que degradam a matéria orgânica e que são também responsáveis por transformar ou remover alguns nutrientes como azoto e fósforo. A degradação pode ocorrer em condições aeróbias ou anaeróbias [6]. Para cada uma destas condições existem diferentes tipos de sistemas biológico (Figura 1) [3].



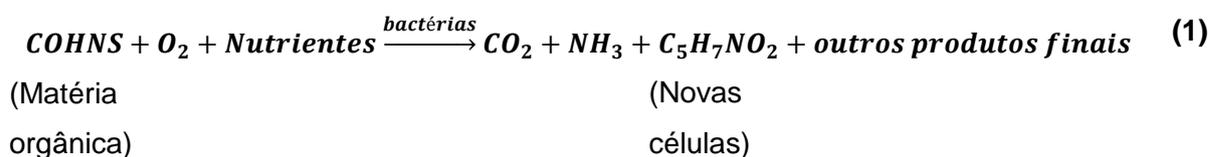
**Figura 1 – Esquema dos processos biológicos mais utilizados. Adaptado de [3]**

Num processo aeróbio, o oxigénio disponível permite a oxidação da matéria orgânica pelos microrganismos, transformando-a principalmente em dióxido de carbono e água.

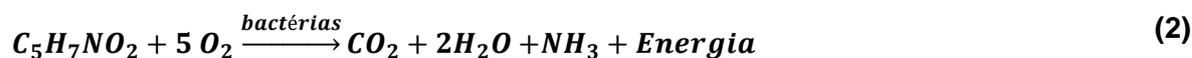
---

Esta reação é de carácter exotérmico, sendo que a energia libertada é utilizada pelos microrganismos para as suas atividades metabólicas. Parte da matéria orgânica é também utilizada como substrato para o crescimento dos microrganismos. As equações (1) e (2) descrevem as reações de metabolismo dos microrganismos [3].

Oxidação e síntese:



Respiração endógena:



O azoto é um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos, no entanto deve evitar-se que este exista em quantidades excessivas nas descargas, visto que a descarga com amónia é tóxica para microrganismos aquáticos e pode ainda provocar um consumo excessivo de oxigénio. Durante o processo de oxidação forma-se nitrato que pode causar nitrificação no meio hídrico [3], [6].

Parte do azoto orgânico é convertido em amónia. Em seguida, a amónia é oxidada por bacterias aeróbias formando nitritos que são posteriormente convertidos a nitratos. A nitrificação é condicionada pelo oxigénio e pela alcalinidade disponível [3], [6].

Num ambiente anóxico, os nitratos resultantes do processo de nitrificação são convertidos a azoto livre, sendo este processo designado por desnitrificação [3].

## 2.3 SISTEMAS DE LAMAS ATIVADAS

### 2.3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Uma das formas de tratamento secundário mais utilizada é o processo de lamas ativadas. Este processo é amplamente utilizado e eficaz no tratamento biológico de águas residuais domésticas e industriais.

A primeira investigação realizada no âmbito deste processo foi no ano de 1880 com os trabalhos de Dr. Augus Smith, que analisou a relação entre o arejamento de águas

residuais e a oxidação da matéria orgânica em tanques. Mais tarde, já em 1910, depois de muitos investigadores estudarem o arejamento de efluentes residuais, Black e Phelps concluem que a injeção de ar na água residual provoca um aumento considerável na sua decomposição [3], [12].

As lamas ativadas são um processo biológico aeróbio de biomassa suspensa com a finalidade de degradar a matéria orgânica suspensa e coloidal presente na água residual através da ação de microrganismos. As lamas biológicas que são constituídas por matéria orgânica (dissolvida e coloidal) são posteriormente sedimentadas [3], [13].

O sistema convencional de lamas ativadas é usualmente antecedido por uma etapa que remove a matéria sedimentável tais como, sólidos mais grosseiros e matéria orgânica na forma de sólidos suspensos. Esta etapa permite diminuir a matéria orgânica que vai ser oxidada no processo de lamas ativadas, reduzindo posteriormente custos de operação do tratamento secundário [3].

O processo de lamas ativadas é constituído por três componentes básicos [3]:

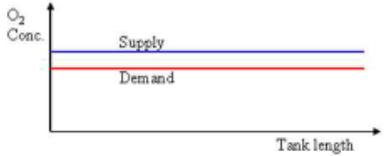
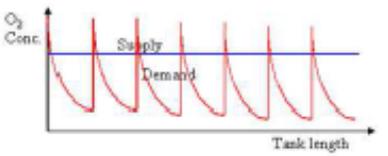
1. Um tanque de arejamento (também conhecido como tanque ou reator biológico), onde os microrganismos são mantidos em suspensão e arejados garantindo as reações físicas, químicas e bioquímicas;
2. Tanques de sedimentação ou clarificadores, que promove a separação líquido-sólido;
3. Sistema de recirculação de sólidos removidos dos tanques de sedimentação para o tanque de arejamento;

O efluente chega ao tanque de arejamento, onde serão proporcionadas condições adequadas de pH, temperatura, oxigénio, nutrientes e tempo de residência. Os microrganismos consomem a matéria orgânica transformando-a em energia utilizada na respiração celular, crescimento, locomoção e multiplicação, produzindo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e novo material celular. A agitação provocada pelo sistema de arejamento faz com que a matéria fique em suspensão, aumentando a eficiência de degradação, uma vez que é assegurado um maior contacto entre os microrganismos e a matéria poluente [3], [14].

De acordo com o modo como é feita alimentação ao tanque de arejamento podem destacar-se três tipos de sistemas (Tabela 1) [3]:

- Sistema *Plug-Flow* (êmbolo) – caracteriza-se por apresentar valores máximos da razão A/M e CBO no ponto de alimentação e mínimos à saída do tanque biológico. O oxigénio é fornecido de forma constante;
- Sistema *complete mix* (mistura completa) – caracteriza-se por valores da razão A/M e CBO constantes ao longo do comprimento tanque biológico, sendo que o oxigénio é fornecido de forma constante;
- Sistemas mistos – Podem diferenciar-se por ter alimentação ou arejamento escalonado. Nos sistemas com alimentação escalonada há células separadas entre por si por pequenos septos que permitem o escoamento de líquido e de lama através do tanque. A CBO decresce de uma forma descontínua. Verifica-se uma melhor utilização do oxigénio fornecido. Nos sistemas com arejamento escalonado o arejamento é fornecido em quantidades decrescentes (tem em consideração a redução progressiva de O<sub>2</sub> requerida para os microrganismos). Verifica-se uma redução nos custos.

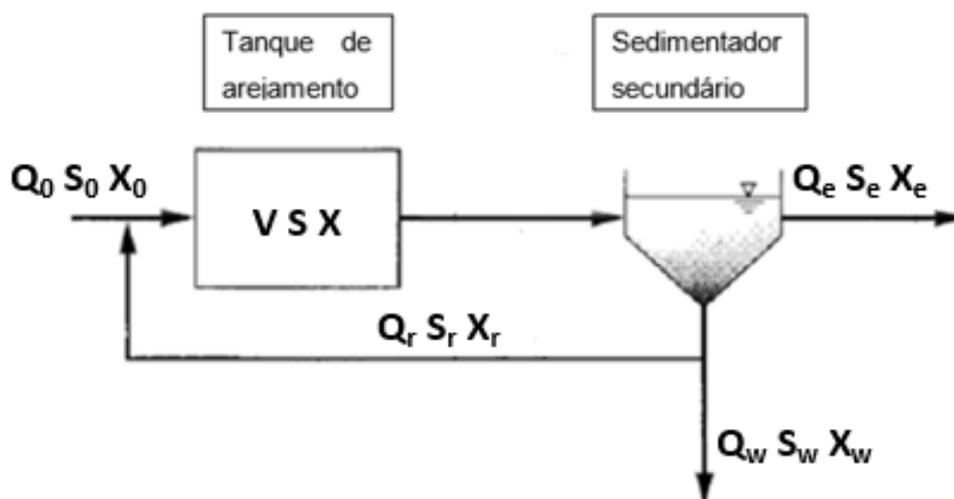
**Tabela 1 – Relação entre o oxigénio fornecido e as necessidades de oxigénio para cada sistema**

<i>Plug-Flow</i>	<i>Complete mix</i>	Sistemas mistos
		

Durante este processo as bactérias agregam-se em flocos aumentando assim a possibilidade de sobrevivência. Estes flocos biológicos são de extrema importância no processo visto que decantam mais rapidamente. No tanque biológico estão ainda presentes protozoários que participam na eliminação de bactérias dispersas no meio, facilitando assim a clarificação do efluente [14], [15].

O líquido resultante da etapa de arejamento, denominado de licor misto, apresenta um baixo teor em matéria orgânica, mas contém ainda elevadas quantidades de sólidos suspensos totais, sendo por isso necessário a inclusão de um decantador a jusante. O

efluente é então encaminhado para o decantador onde os sólidos sedimentam, clarificando-o. Através de um sistema de recirculação, as lamas retornam ao reator biológico (Figura 2). O processo de recirculação é imprescindível para manter o sistema em equilíbrio, dado que parte dos microrganismos são também decantados e necessitam de voltar ao sistema [6]. As lamas produzidas diariamente constituem as lamas em excesso que têm de ser extraídas do sistema e submetidas a um tratamento adequado.



**Figura 2 - Esquemática do processo de lamas ativadas. Adaptado de [3]**

Onde  $Q, S, e X$  significam caudal, concentração de substrato e concentração de SSV e os subscritos  $0, r, e$  e  $w$  são referentes ao influente, recirculado, efluente e purga de lamas.

Comparativamente a outros processos de tratamento biológicos, o sistema de lamas ativadas apresenta como vantagens:

- Elevada eficiência de tratamento quanto à remoção de matéria orgânica;
- Flexibilidade de operação;
- Não necessita de grande área de construção relativamente aos sistemas de lagoas e filtração biológica.

Por outro lado, este tipo de processo apresenta um investimento inicial moderado associado a um consumo energético muito significativo. Exige também um controlo operacional muito exaustivo, implicando custos de operação/manutenção que advêm de equipamentos para auxiliar todo o processo [6], [14].

---

### 2.3.2 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O TRATAMENTO E PARÂMETROS OPERATÓRIOS

- TEMPERATURA

A temperatura é um parâmetro de extrema importância dada a sua influência no crescimento e decaimento dos microrganismos. Diferentes tipos de microrganismos conseguem sobreviver em diferentes gamas de temperaturas, tendo no entanto uma temperatura ótima de crescimento. Por este motivo podem classificar-se em diferentes classes como se verifica na tabela abaixo (Tabela 2) [16].

**Tabela 2 – Classificação dos microrganismos de acordo com a sua temperatura ótima de crescimento[16]**

<b>Microrganismos</b>	<b>Gama de temperatura</b>	<b>Temperatura ótima (°C)</b>
Psicrofílicos	-10 a 30	12 a 18
Mesofílicos	20 a 50	25 a 40
Termofílicos	35 a 75	55 a 65

Além disso, a temperatura vai influenciar a transferência de oxigénio e as características de sedimentação das lamas. Isto conduz a alterações na cinética do processo e influencia as taxas de oxidação. Globalmente o aumento da temperatura, diminui a taxa de transferência de oxigénio [3], [4], [9].

- PH

A oxidação dos compostos orgânicos é favorecida entre para valores de pH entre 6,0 e 9,0. Para valores superiores a esta gama a atividade microbiana é inibida, enquanto que abaixo dela, são proporcionadas condições para o aparecimento de fungos. Os fungos são prejudiciais ao processo já que vão competir pelo substrato com as bactérias. A influência do pH no tratamento biológico reflete-se tanto na atividade enzimática como na toxicidade de alguns compostos produzidos [3], [6], [16].

No tratamento biológico é comum que o controlo do pH seja dispensável. Isto deve-se ao facto de existir uma elevada capacidade tampão nas águas residuais, mantendo assim o pH dentro da gama ótima [3], [6], [16].

- NECESSIDADE DE OXIGÉNIO

Durante o tratamento aeróbio é necessário oxigénio para a oxidação da matéria orgânica, respiração endógena e nitrificação.

Para que a atividade microbiana mantenha-se ativa é necessário que a concentração de oxigénio dissolvido se encontre entre 1 e 2 mg/L no tanque biológico se não houver nitrificação e 3 mg/L se houver [3].

- NUTRIENTES

Nas águas residuais estão presentes uma larga variedade de compostos orgânicos e inorgânicos que apresentam vários nutrientes necessários ao crescimento dos microrganismos. Nutrientes como o nitrogénio (N) e o fósforo (P) exercem importantes funções no metabolismo dos microrganismos. De acordo com o *Metcalf & Eddy* (2014) existe uma relação ótima entre CBO<sub>5</sub>:N:P de 100:5:1 [3].

- CARGA ORGÂNICA MÁSSICA – RAZÃO ALIMENTO/MICRORGANISMO

A razão alimento/microrganismos (A/M) resulta do quociente entre o caudal mássico de substrato alimentado e a quantidade de biomassa contida no reator (MLVSS), usualmente expressa em unidades de SSV.

Quando este parâmetro assume valores elevados significa que há um excesso de alimento, o que aumenta o metabolismo dos microrganismos, provocando um aumento na remoção de CBO. No entanto, nestas condições os microrganismos têm tendência a dispersar não formando flocos. Não obstante, quando o alimento é fornecido em excesso ocorre uma diminuição na assimilação do substrato. Isto acontece porque nem toda a matéria orgânica consegue ser degradada, podendo contribuir para um aumento de CBO no efluente final. Numa situação em que o alimento é um pouco mais escasso, a taxa metabólica dos microrganismos diminui rapidamente, conduzindo a uma fase de respiração endógena, provocando a lise celular e a renovação de células. Neste caso, a oxidação da matéria orgânica é praticamente completa, resultando num efluente final com boa qualidade e os microrganismos a flocularem e sedimentarem eficientemente [15].

De acordo com a relação A/M, podem classificar-se diferentes sistemas [4]:

- Sistemas de alta carga ou arejamento rápido. Caracterizam-se por elevados valores da razão A/M e baixa permanência de microrganismos e água residual a tratar. No entanto, observa-se elevada taxa de remoção de matéria orgânica, elevada produção de lamas e baixo consumo de oxigénio por unidade de matéria orgânica eliminada;
- Sistemas de média carga ou arejamento convencional. Caracterizam-se por valores médios da razão A/M. Verifica-se escassez de substâncias nutritivas disponíveis o que limita o crescimento dos microrganismos. Há um consumo médio de oxigénio e produção média de lamas;
- Sistemas de baixa carga ou arejamento prolongado. Referem-se a valores muito baixos da razão A/M, o que indica a permanência de microrganismos e água residual durante um elevado período de tempo. Observa-se escassez de alimento e auto - oxidação dos microrganismos, traduzindo-se em menores consumos de oxigénio com pouca produção de lamas.

**Tabela 3 – Valores típicos para a carga orgânica mássica e tempo de retenção hidráulico [3]**

<b>Classificação dos processos</b>	<b>Carga orgânica mássica (kg CBO.kg MLVSS<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>)</b>	<b>TRH (h)</b>
<b>Arejamento prolongado</b>	0,05 – 0,15	18 – 36
<b>Convencional</b>	0,2 – 0,4	4 – 8
<b>Alta carga</b>	0,4 – 1,5	2 – 4

- CARGA ORGÂNICA VOLÚMICA

A carga orgânica representa a quantidade de matéria orgânica aplicada ao sistema, por unidade de volume e por unidade de tempo. É habitualmente expressa em kg de CBO ou CQO por dia.

Durante o processo de lamas ativadas, elevadas cargas orgânicas podem implicar uma diminuição da eficiência do processo que se traduzem em elevadas concentrações de CBO [3].

- TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO

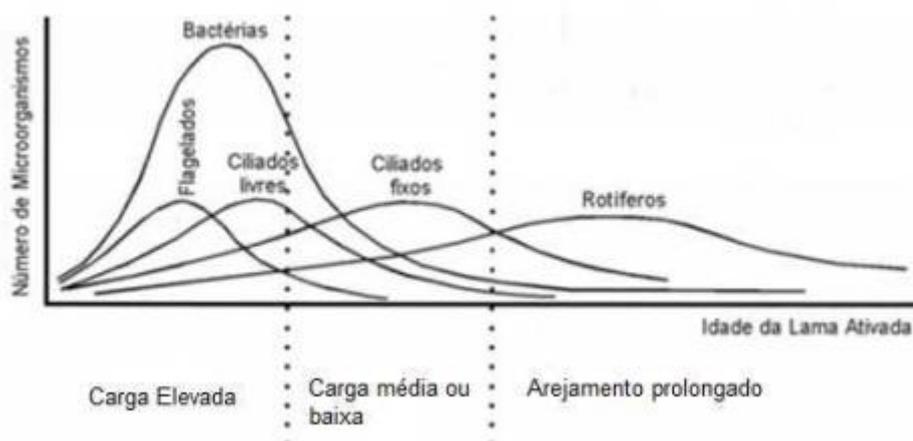
O tempo de retenção hidráulico (TRH) permite estimar o tempo médio que a água residual permanece no sistema biológico e é traduzido através do quociente entre o volume do reator e o caudal de alimentação a este sistema [3], [4].

Num sistema de lamas ativadas, o TRH não tem em consideração o caudal de lamas recirculadas, que pode representar cerca de 25 a 100 % do caudal do efluente, fazendo com este parâmetro seja muito menor que o calculado [15].

- TEMPO DE RETENÇÃO DE SÓLIDOS (TRS)

O tempo médio de permanência dos microrganismos no sistema de tratamento biológico traduz-se na idade das lamas também designado por tempo de retenção de sólidos (TRS). Este parâmetro é quantificado através do quociente entre a massa de microrganismos responsável pelo tratamento e a massa de microrganismos removida do sistema por unidade de tempo [3], [17].

Uma reduzida idade das lamas (inferior a 0,5 dias) está associada a uma elevada taxa de crescimento, característica típica dos sistemas de alta carga. Enquanto uma baixa taxa de crescimento está associada a uma elevada idade das lamas, característica típica nos sistemas de arejamento prolongado (Figura 3) [3], [17].



**Figura 3 – Evolução dos grupos de microrganismos em função da idade da lama (CANLER, PERRET, DUCHÈNE, & COTTEUX, 1999)**

---

- ÍNDICE VOLUMÉTRICO DAS LAMAS

A sedimentação apresenta um grande impacto no funcionamento do sistema de lamas ativadas. O índice volumétrico das lamas (IVL) é um parâmetro que permite aferir sobre as características de sedimentação e floculação das lamas, sendo definido como o volume ocupado por 1 grama de sólido após 30 minutos de sedimentação numa proveta graduada de 1 L. Quanto maior a sedimentação, menor será o IVL. Valores abaixo de 100 mL/g indicam boa capacidade de sedimentação das lamas [3].

A sedimentação das lamas é afetada negativamente pelo aparecimento de bactérias filamentosas e pela ocorrência de desnitrificação no decantador secundário. A formação de bolhas de azoto gasoso provoca a flutuação de sólidos, arrastando-os para a superfície [18].

### 2.3.3 SISTEMA DE AREJAMENTO

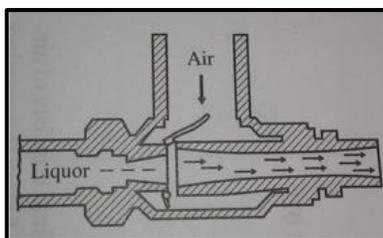
O bom funcionamento dos sistemas biológicos aeróbios depende da disponibilidade de oxigénio. Devido à baixa solubilidade do oxigénio na água e à conseqüente baixa taxa de transferência, a interface água - ar não é suficiente para garantir os requisitos aeróbios. Neste contexto, torna-se fundamental fornecer elevadas quantidades de oxigénio de forma a garantir o normal funcionamento do sistema biológico. Emerge assim a necessidade de aumentar as superfícies de contacto água – ar, através da utilização de equipamentos de arejamento [3].

Um correto dimensionamento do sistema biológico permitirá identificar as variações de oxigénio dissolvido, possibilitando assim a sua otimização e conseqüentemente poupança energética [3]. Os sistemas de arejamento a serem utilizados no tanque de lamas ativadas dependem da função para que são desenvolvidos, do tipo e geometria do reator, bem como dos custos associados à instalação e operação [19].

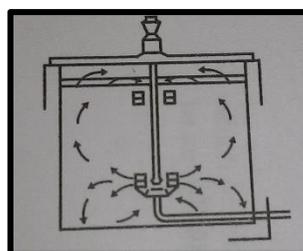
Os três métodos mais comuns para fornecer oxigénio a estes processos biológicos são através de sistemas por ar difuso, sistemas por arejamento mecânico ou sistemas de arejamento por oxigénio puro [3], [17].

Os sistemas de arejamento por ar difuso ou por oxigénio consistem em equipamentos de arejamento que introduzem ar ou oxigénio puro e que estão submersos no tanque biológico. Por motivos económicos, os sistemas de arejamento por ar difuso são utilizados em larga escala comparativamente aos de oxigénio puro. Já os sistemas de arejamento

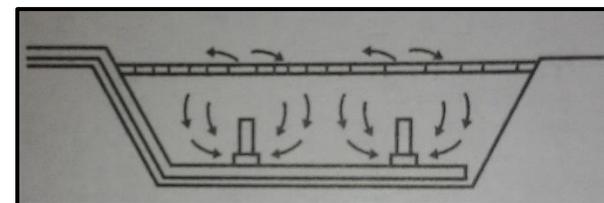
mecânico têm a finalidade de agitar a água mecanicamente e promover a captação de ar da atmosfera [3]. Na Figura 4 encontram-se alguns exemplos de equipamentos para arejamento.



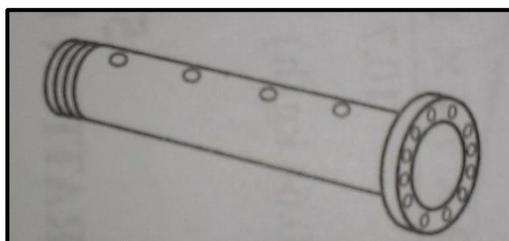
Difusor injetor de ar



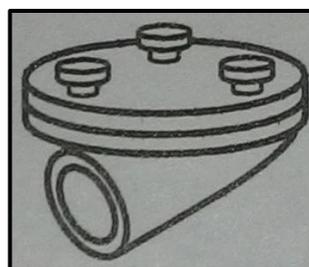
Arejamento por turbinas



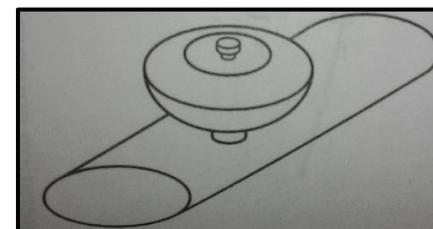
Arejamento estático



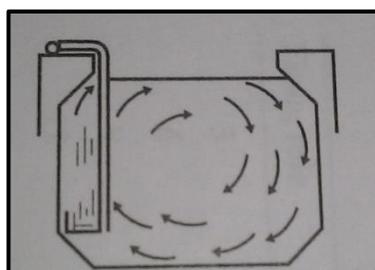
Tubo difusor



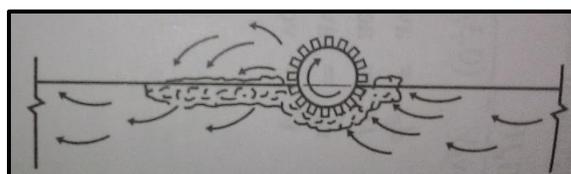
Difusor de poro fino



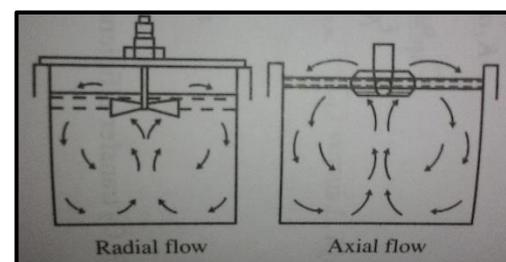
Difusor de poro grosso



Arejamento por bolha



Escova de kessner



Arejamento superficial com eixo vertical ou horizontal

Figura 4 – Equipamentos para arejamento. Adaptado de [19]

As necessidades de oxigénio variam com o tempo de acordo com a CBO, cargas e concentração de amónia. Se o oxigénio for fornecido de forma constante, previsivelmente haverá períodos com défice de arejamento e outros com excesso. Nestes períodos onde se fornece oxigénio em excesso está associado um consumo energético desnecessário que implicará de igual forma custos desnecessários [20]. Uma das alternativas foca-se no controlo do oxigénio dissolvido através de equipamentos de operação proporcionando um arejamento adequado e ajustado às necessidades reais [3].

O contínuo arejamento no tanque garante o oxigénio necessário à sobrevivência dos microrganismos e preserva os flocos biológicos num estado de suspensão no efluente promovendo assim o máximo de contacto com a água residual. Além disso, a constante agitação promove a transferência de massa e dispersa produtos finais do metabolismo dos flocos [15].

O oxigénio fornecido ao tanque de arejamento deve suprimir as necessidades dos microrganismos para oxidarem a matéria orgânica. No entanto, devido à baixa taxa de transferência do oxigénio para a água, só uma pequena parte deste é consumido pelos microrganismos, dando a possibilidade de organismos filamentosos poderem predominar. Neste caso, verifica-se uma diminuição da capacidade de sedimentação e da qualidade da lama [3], [12], [21].

O sistema de arejamento deve ser dimensionado para um mínimo de oxigénio dissolvido de 2 mg/L no tanque de arejamento se não houver nitrificação e 3 mg/L caso haja. Acima de 4 mg/L aumentam de forma significativa os custos associados aos gastos de energia [3].

### *2.3.5 GAMAS TÍPICAS PARA OS PROCESSOS DE LAMAS ATIVADAS MAIS COMUNS*

Na Tabela 4 está apresentado as gamas típicas para diversos processos de lamas ativadas.

Tabela 4 – Gamas típicas para os processos de lamas ativadas mais comuns [1]

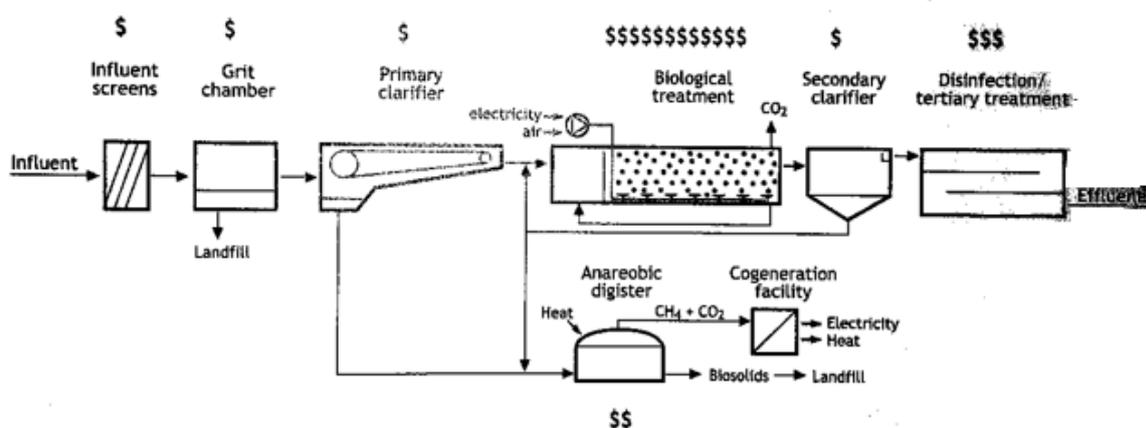
Parâmetro	TRS [d]	Carga orgânica mássica [kg CBO.kg MLVSS <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> ]	Carga orgânica volúmica [kg CBO.m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup> ]	Concentração de sólidos [mg.L <sup>-1</sup> ]	Tempo de retenção hidráulico [h]
Êmbolo (Plug Flow Reator)	3 – 15	0,2 – 0,4	0,3 – 0,7	1000 – 3000	4 – 8
Mistura completa (Complete Mix)	3 – 15	0,2 – 0,6	0,3 – 1,6	1500 – 4000	3 – 6
Alta taxa de arejamento (High-Rate Aeration)	0,5 – 2	1,5 – 2,0	1,2 – 2,4	500 – 1500	1 – 2
Estabilização de contacto (Contact Stabilization)	5 – 10	0,2 – 0,6	1,0 – 1,3	1000 – 3000	0,5 – 1
Alimentação por etapas (Step Feed)	3 – 15	0,2 – 0,4	0,7 – 1,0	1500 – 4000	3 – 5
Arejamento prolongado (Extend Aeration)	20 – 40	0,04 – 0,1	0,1 – 0,3	2000 – 4000	20 – 30
Descontínuo (Sequencing Batch Reator)	15 – 30	0,04 – 0,1	0,1 – 0,3	2000 – 5000	15 – 40

## 2.4 GESTÃO ENERGÉTICA NAS ETAR

Um dos maiores desafios do setor das águas residuais é aliar o *design* ideal de uma a ETAR a um eficiente processo de tratamento mantendo o investimento e o custo operacional o mais baixo possível e garantindo o cumprimento dos critérios de qualidade [1].

Estima-se que a energia consumida nas ETAR corresponde a cerca de 1% do consumo energético de um país. Cada vez mais torna-se imperativo aumentar o conhecimento sobre o consumo energético nas ETAR de forma a diminuir custos, reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e o aquecimento global. A redução energética torna-se assim um desafio económico e ambiental das sociedades atuais [22], [23]. Segundo a associação *Water Environmental Federation* (2008), a energia utilizada nas ETAR é significativamente afetada pelo tamanho desta, localização, características da água residual, nível de tratamento, estratégias de recuperação energética, tipo de tratamento e processos utilizados e modo de operação [4]. Em Portugal cerca de 25 % dos gastos totais de uma ETAR convencional são relativos aos consumos elétricos [24].

Nas ETAR são utilizadas diferentes combinações de operações físicas, químicas e biológicas, para remover vários nutrientes e sólidos. É por este motivo que são necessários diferentes equipamentos e processos que requerem energia para o seu funcionamento [3]. Na Figura 5 é possível observar uma análise qualitativa dos custos energéticos associados a cada órgão numa ETAR [2].



**Figura 5 - Comparação qualitativa dos custos energéticos em diferentes órgãos numa ETAR. Adaptado de [2]**

Para melhorar a eficiência energética de uma ETAR é necessário um conhecimento prévio acerca da energia despendida em cada processo de tratamento de forma a desenvolver guias e estratégias para otimizar os consumos [24]. No topo dos guias e estratégias os sistemas de gestão energética são dos mais recomendados. A norma ISO (International Standard Organization) 50001:2011 foi desenvolvida pela Organização Internacional de Normalização como futura norma internacional para a gestão de energia. Regida pela melhoria contínua do desempenho ambiental, permite avaliar o nível de melhorias energéticas e a conseqüente diminuição dos gases com efeito de estufa. Estima-se um impacto até 60% dos consumos mundiais de energia [25].

De acordo com a norma ISO 50001, o desempenho energético pode ser definido através de resultados mensuráveis relacionados como a eficiência, o uso energético e o consumo energético [24].

---

### 2.4.1 OTIMIZAÇÃO DA ETAR

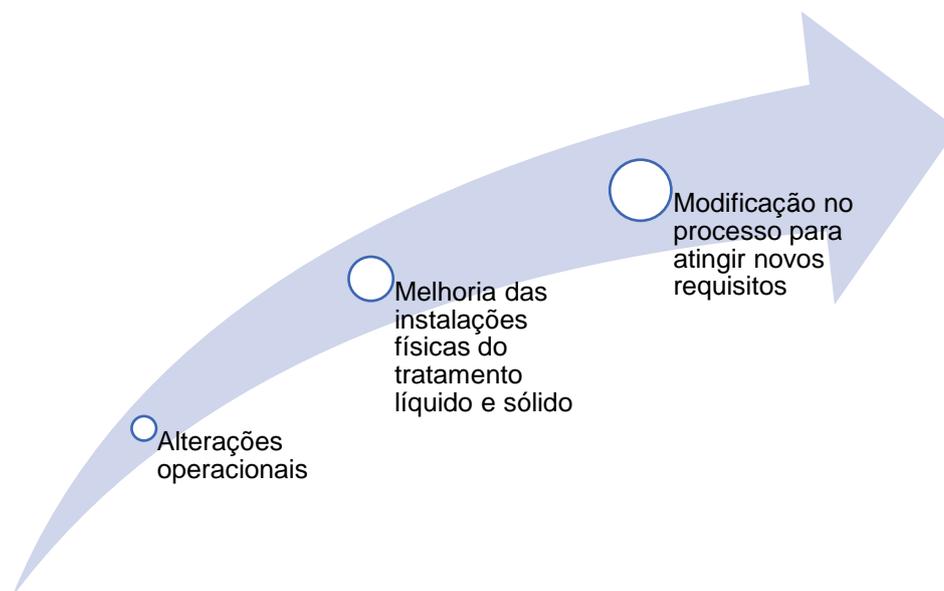
Como resultado de alterações sociais, económicas e tecnológicas, as ETAR encaram cada vez mais desafios, nomeadamente a nível energético. Frequentemente, estes desafios podem ser remetidos para a otimização de parâmetros e procedimentos operacionais, para a modernização das instalações e para a substituição de equipamentos e processos. O desenvolvimento destas melhorias, normalmente, requer a utilização de ferramentas sofisticadas e de protocolos [3], [22].

A otimização do funcionamento de uma ETAR pode ser conseguida através da modificação de operações e instalações existentes com a finalidade de melhorar a sua operação, manutenção ou desempenho ou pela adição de novas instalações que aumentem a eficiência do tratamento [3].

As modificações realizadas a nível operacional ou de um equipamento têm como finalidade diminuir os custos associados à energia. As alterações operacionais podem ser afetas a um processo ou sistema e normalmente estão associadas a uma baixa diminuição de custos e a um rápido impacte. Por outro lado, a alteração dos processos ou equipamentos requer um grande investimento inicial [3].

A melhor forma de avaliar o estado inicial de consumos é realizar uma auditoria energética à instalação. Neste âmbito, existem várias abordagens pelas quais se pode optar. Por um lado tem-se uma análise mais geral de modo a identificar os principais utilizadores de energia. Por outro lado, pode conduzir-se uma auditoria mais minuciosa, identificando os componentes dos processos mais consumidores [3]. Estatisticamente só uma análise mais detalhada do consumo energético realizada a cada processo pode revelar onde e como se pode reduzir a energia [22].

Após a primeira análise, é possível identificar, se existirem, os problemas relacionados com a diminuição da eficiência da ETAR. A resolução destes problemas pode interpretada de acordo com três bases que diferem entre si no tipo de resposta e na sua complexidade (Figura 6) [3].



**Figura 6 – Categorias de respostas aos problemas no aumento da eficiência numa ETAR**

→ Alterações operacionais

Os problemas mais comuns durante o tratamento de águas residuais estão, normalmente, associados à variação da natureza, à carga e ao caudal do efluente a tratar. Estes problemas podem ser resolvidos com pequenas ações nos processos de forma a maximizar a capacidade de tratamento da ETAR e cumprindo os requisitos de controlo de qualidade do efluente para que este possa ser descarregado [3], [26].

→ Melhoria das instalações físicas do tratamento líquido e sólido

Embora as instalações compreendam todos os órgãos necessários ao tratamento da água residual, por vezes estes podem operar fora da sua gama de dimensionamento. Nestes casos, é necessário aumentar o seu desempenho através da adição de constituintes que permitam controlar e verificar o funcionamento do órgão [3].

As principais vantagens dos controlos operacionais focam-se em minimizar os efeitos que advêm da variação das características do efluente, adaptando-se também às variações sazonais. Permitem assim aumentar a capacidade de tratamento sem expansão física da ETAR, reduzindo custos operacionais tanto a nível energético como de recursos humanos [12], [20]. No entanto, enfrentam algumas dificuldades como o desfasamento de tempo e a capacidade de resposta derivada da variabilidade do afluente. Estes problemas têm sido minimizados através do desenvolvimento de equipamentos mais precisos e económicos e através de tecnologia inovadora e modelos computacionais e matemáticos mais concretos. Os autores Ozturk *et al.* referem que ainda existe um grande ceticismo em relação à

---

otimização do arejamento no processo de lamas ativadas dada a elevada complexidade do processo e do investimento resultante da aplicação de estratégias de controlo avançado. Referem ainda que por segurança, é geralmente fornecido oxigénio em excesso ao processo para evitar efeitos na qualidade do efluente [27].

Pequenos ajustes operacionais ou pequenos investimentos em controlos ou automação têm normalmente impacte imediato na redução energética, sem diminuir a eficiência de tratamento [3], [22], [27].

Au *et al.* (2013) referem algumas recomendações para a poupança de energia numa ETAR [28]:

- Instalação de variadores de frequência nas bombas para ajustar às necessidades do efluente, resultando assim uma eficiente razão entre a energia eléctrica despendida pela bomba e a energia necessária para bombear a água. Estima-se que uma redução de 20 % na velocidade pode reduzir até 50 % do consumo energético.
- Substituição dos motores convencionais por motores mais eficientes, que são tipicamente 2 a 6% mais eficientes;
- Instalação de sistemas de monitorização e controlo de oxigénio dissolvido em tanques de arejamento;
- Implementação de testes periódicos de desempenho das bombas e reparação ou substituição destas quando não forem eficientes;
- Geradores para situações de emergência durante períodos de pico para reduzir a falta de energia;
- Instalação de dispositivos para monitorizar a carga afluente à ETAR;
- Instalação de acumuladores de energia eléctrica (*capacitors banks*) para aumentar o fator de energia. Melhorar o fator de energia está associado à melhoria da tensão, à diminuição das perdas no sistema e à diminuição dos gastos energéticos.

→ Modificação no processo para atingir novos requisitos

Relaciona-se com a alteração de equipamentos e processos com vista a atingir novos objetivos, tais como por exemplo, a inserção de tratamento terciário ou a alteração do tipo de tratamento secundário;

#### 2.4.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO – CONSUMO ENERGÉTICO

Normalmente numa ETAR convencional, o processo que envolve o maior consumo energético é o tratamento biológico por sistema de lamas ativadas que requer energia para o arejamento, para o bombeamento e recirculação do efluente [2]–[4]. Seguidamente, vêm os sistemas de bombagem para transporte das águas residuais, das lamas líquidas, dos biosólidos e do processamento da água. Por fim, os equipamentos para o espessamento e desidratação das lamas apresentam também uma cota importante no que respeita aos consumos energéticos [3], [29].

A Figura 7 apresenta a distribuição energética utilizada numa ETAR convencional. É possível observar que o tratamento biológico por sistema de lamas ativadas consome mais de metade dos gastos energéticos numa ETAR convencional.. Neste tipo de tratamento, estima-se que entre 1100 a 2400 MJ são necessários para o tratamento de cada 1000 m<sup>3</sup> de águas residuais [3].

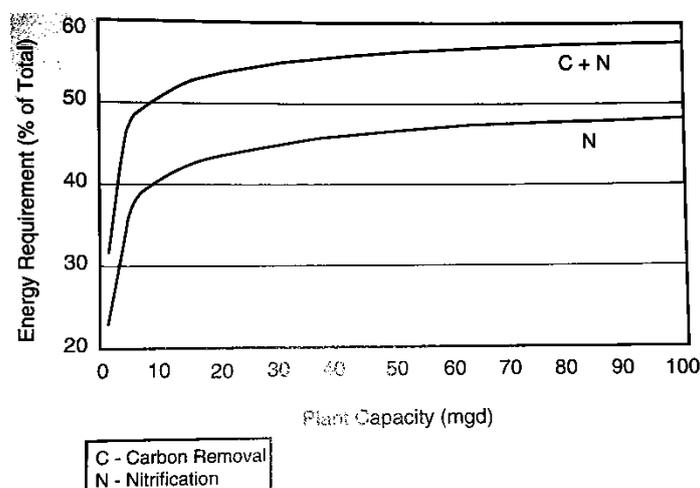


**Figura 7 – Distribuição energética usada numa ETAR convencional [3]**

Vários são os fatores que interferem com o grau de otimização que o sistema de lamas ativadas pode alcançar. Destes destacam-se os seguintes: a capacidade de tratamento da ETAR, número e *design* dos reatores, o processo de nitrificação/desnitrificação, os níveis de oxigénio dissolvido e os equipamentos de arejamento [4].

- *CAPACIDADE DE TRATAMENTO DA ETAR*

A Figura 8 ilustra os requisitos energéticos (percentagem do consumo total da ETAR) para o tratamento do pelo sistema de lamas ativadas (inclui arejamento, bombagem de recirculação e clarificação secundária). Expectavelmente, ao processo de nitrificação estão associados elevados gastos energéticos provenientes do elevado arejamento. É possível observar que estações relativamente pequenas, dimensionadas para tratar até 57000 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> (15 mgd) são fortemente afetadas nos consumos energéticos quando há variações de caudal. Por outro lado, nas ETAR de grandes dimensões, a variação de caudal interfere pouco nos consumos energéticos [4].



**Figura 8 – Requisitos energéticos do sistema de lamas ativadas (mgdx3785 = m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>). Adaptado de [4]**

- *NÚMERO DE REATORES*

As ETAR são projetadas para um horizonte de vários anos. Prevendo um aumento futuro do caudal a tratar podem ter dois ou mais reatores biológicos. Nestes casos e enquanto não se atinge o horizonte de projeto, é útil avaliar-se a possibilidade de retirar pelo menos um de operação, otimizando a razão A/M, o TRS, o TRH e a produção de lamas. Com menos reatores em funcionamento é mais simples controlar os níveis de oxigénio dissolvido, o que implica uma redução de custos [4].

- *PROCESSO DE NITRIFICAÇÃO/DESNITRIFICAÇÃO*

A ocorrência desnecessária do processo de nitrificação conduz a um dos maiores consumos ineficientes de energia. Normalmente a nitrificação ocorre na presença de um elevado TRS ou baixa razão de A/M. A nitrificação provoca um aumento das necessidades

de oxigénio, conduzindo a custos acrescidos. Uma das estratégias tipicamente utilizadas para evitar a nitrificação é manter a razão A/M elevada [4].

#### ▪ NÍVEIS DE OXIGÉNIO DISSOLVIDO

Normalmente, o arejamento no tanque biológico é fornecido em excesso. No entanto é possível reduzi-lo até 50% com o mínimo efeito na qualidade do efluente tratado [30]. Apesar do excesso de arejamento ser utilizado em muitas ETAR por ser considerada uma boa prática para garantir o tratamento, isto resulta em muita energia desperdiçada. Na Figura 9 pode-se observar a relação entre o fornecimento de energia e o nível de oxigénio dissolvido presente no licor misto (efluente proveniente do reator biológico) [4]. Esta relação assume uma tendência exponencial, sendo que acima de uma concentração de  $2 \text{ mg.L}^{-1}$  (OD no licor misto) a energia necessária para fornecer um kg de oxigénio é consideravelmente superior à energia necessária para fornecer a mesma quantidade de  $\text{O}_2$ , abaixo de  $2 \text{ mg.L}^{-1}$ .

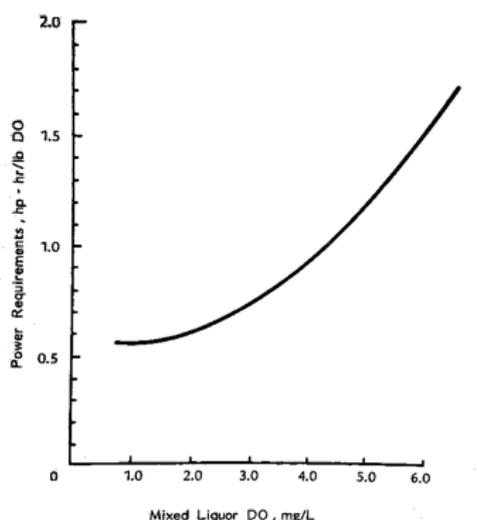


Figura 9 – Oxigénio dissolvido no licor misto vs energia requerida ( $\text{hp-hr/lb DO} \times 5.919 = \text{mJ/kg}$ ). Adaptado de [4]

#### 2.4.3 EQUIPAMENTOS DE AREJAMENTO

Vários estudos foram desenvolvidos de forma a compreender e otimizar o processo de arejamento no sistema de lamas ativadas. Fikar *et al.* desenvolveram uma abordagem utilizando um modelo dinâmico de otimização cujo objetivo foi determinar os tempos e parâmetros ótimos do sistema de arejamento [31]. De igual forma, Chachuat *et al.* utilizaram uma abordagem semelhante de modo a estimar a sequência de períodos on/off num processo de funcionamento alternativo do sistema de lamas ativadas [32]. Também Balku *et*

---

*al.*, através de um modelo dinâmico e uma simulação *start-up* desenvolveram um sistema de operação contínuo para otimizar o processo de lamas ativadas utilizando um algoritmo para o cálculo do arejamento ótimo utilizada para o mínimo de energia consumida [33].

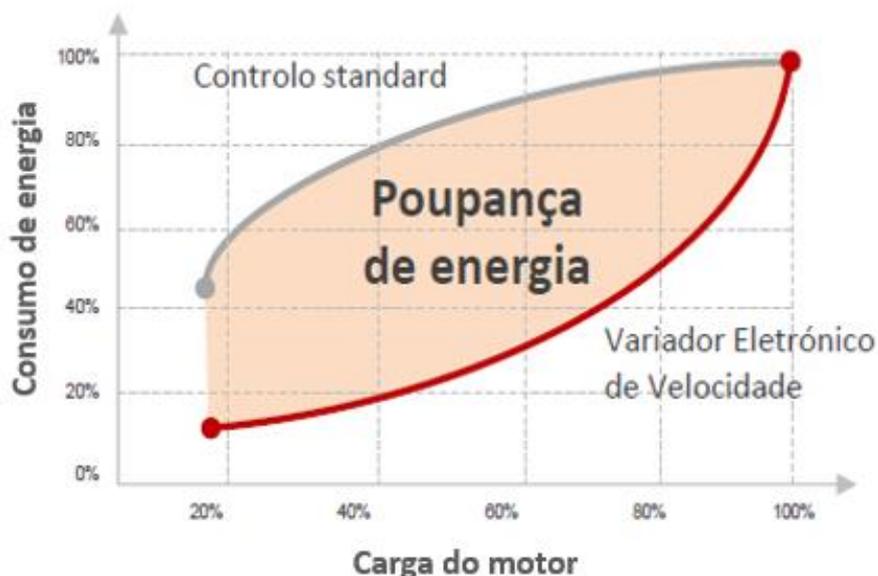
Amand *et al.* examinaram como o nível de arejamento deve ser controlado no processo de lamas ativadas com nitrificação de forma a cumprir os limites de descarga das águas residuais de uma forma eficiente, utilizando para tal um sistema de controlo do sistema de arejamento [34]. Também Mamais *et al.* conduziram uma pesquisa para analisar a influência dos parâmetros operacionais (alteração dos *set-point* do nível de OD e otimização do TRS) nos consumos de forma a gerar um conjunto de estratégias que possam reduzir os gastos energéticos [35].

#### 2.4.4 VARIADORES DE FREQUÊNCIA

Os motores elétricos representam um papel fundamental na operação de arejamento das ETAR, que por sua vez se refletem num elevado peso em termos de custos energéticos associados ao seu funcionamento. Em média, mais de 95 % dos custos associados à vida útil de um motor resultam do consumo energético, sendo que apenas 5 % advém do investimento inicial e manutenção. É nesta perspetiva que se torna fundamental, repensar em alternativas de forma a minimizar o consumo energético. Entre várias opções, a instalação de variadores de frequência são uma das principais formas para otimizar o funcionamento dos motores [36] [37].

Os variadores de frequência são equipamentos amplamente utilizados principalmente em situações em que ocorra sobre-dimensionamento dos motores, em que haja elevada variabilidade da carga exigida ao motor ou quando é elevado o número de horas de utilização [36]. O rendimento do motor define-se como a relação entre a potência elétrica fornecida e a potência do motor, e será sempre inferior à unidade [37].

Como se observa na Figura 10, os variadores de frequência estão associados ao aumento do rendimento global dos sistemas, em termos energéticos.



**Figura 10 – Comparação do consumo de energia de sistemas de controlo manuais com variadores de frequência [36]**

Os variadores de frequência são dispositivos que permitem variar a velocidade, através de um controlo eletrónico de voltagem e frequência, quer durante o seu arranque, quer durante o regime de funcionamento normal. Apresentam duas funções principais [36], [37]:

- Otimizar a velocidade do motor a cada momento, de forma a responder apenas às necessidades reais do processo, mantendo o motor em regime ótimo;
- Otimizar o arranque e paragens do motor. Permite a realização de arranques e paragens progressivas dos motores, evitando picos de tensão.

Para além de reduzirem o consumo de energia, outras vantagens também estão associadas à utilização destes equipamentos[36], [37]:

- Aumento da vida útil dos motores, mediante a redução dos picos de energia que provocavam desgaste nos motores;
- Controlo contínuo e permanente do processo, diminuindo as necessidades de manutenção do sistema de arejamento.

---

## 3 ESTÁGIO

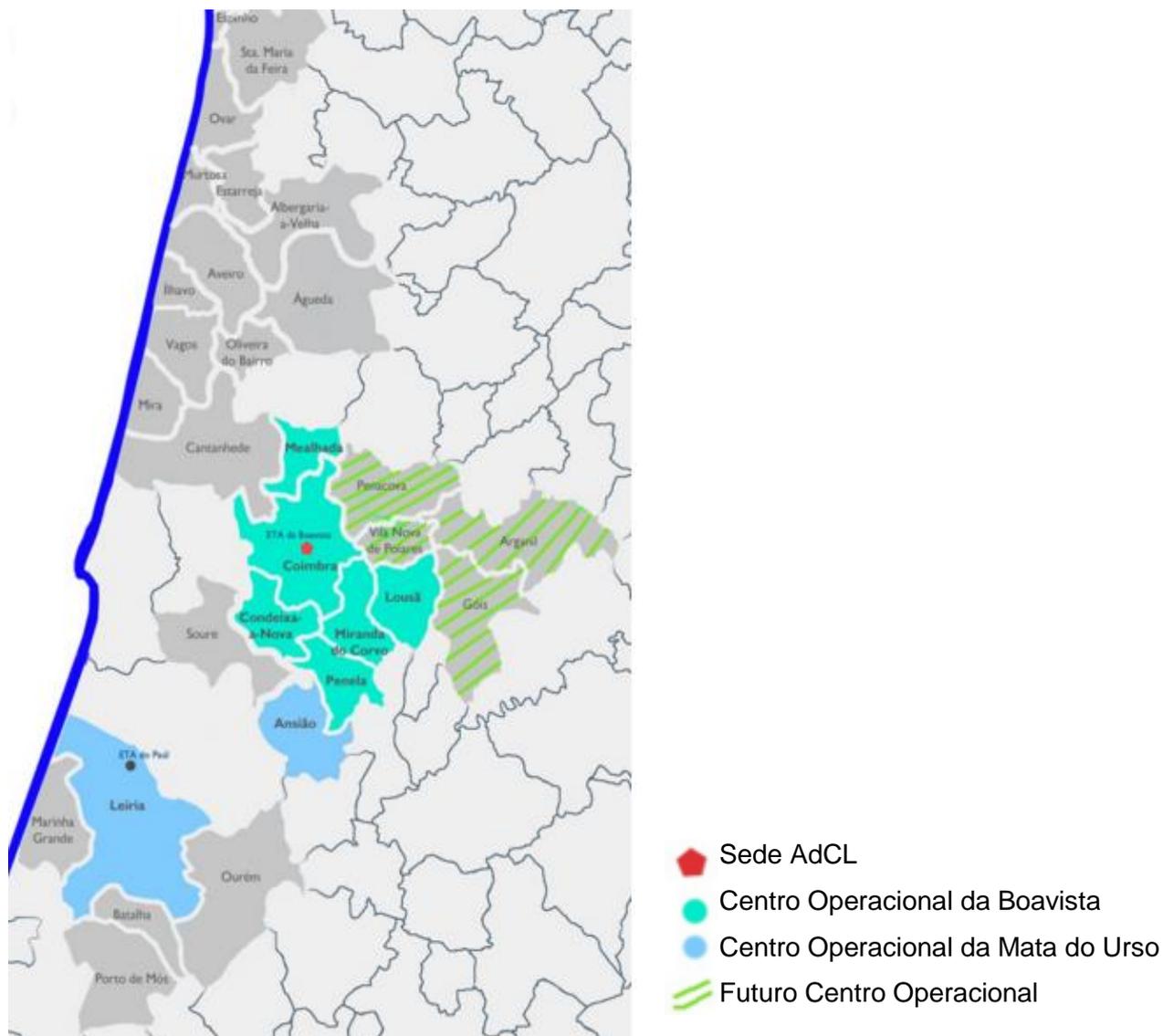
### 3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O Sistema Multimunicipal de Água e de Saneamento do Centro Litoral de Portugal foi criado a 29 de Maio de 2015 e resulta da união do sistema multimunicipal de saneamento da ria de Aveiro, do sistema multimunicipal de saneamento do Lis e do sistema multimunicipal de abastecimento de água e saneamento do Baixo Mondego - Bairrada [38].

Durante 30 anos, foi concedido à sociedade Águas do Centro Litoral (AdCL), S.A., a concessão da exploração e gestão do sistema municipal de abastecimento de água e de saneamento do centro litoral de Portugal. Este primordial objetivo era, anteriormente, do domínio das três sociedades extintas: SIMRIA (Saneamento Integrado dos Municípios da Ria, S.A.), SIMLIS (Saneamento Integrado dos Municípios do Lis) e Águas do Mondego [38].

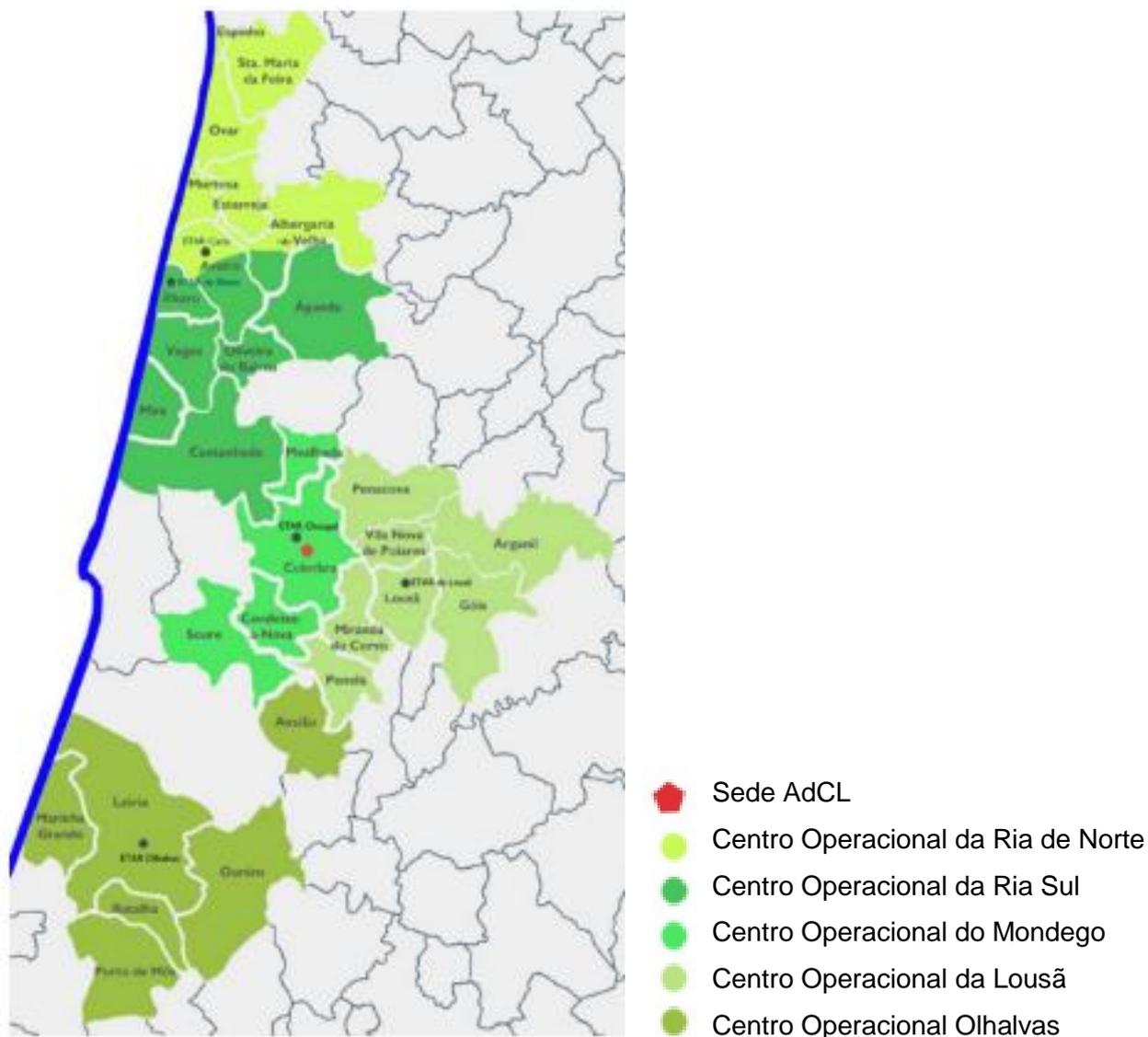
A AdCL, S.A. abrange duas áreas distintas de atuação. A primeira diz respeito ao abastecimento de água e a segunda ao saneamento. Deste modo a captação, tratamento e o abastecimento de água para consumo público e a recolha, tratamento e rejeição das águas residuais são competências que a AdCL assume, garantindo que todas as disposições legais sejam cumpridas[38].

No que respeita à primeira área de atuação, o sistema multimunicipal pretende abastecer os municípios de Ansião, Arganil, Coimbra, Condeixa-a-Nova, Góis, Leiria, Lousã, Mealhada, Miranda do Corvo, Penacova, Penela e Vila Nova de Poiares, totalizam no horizonte de projeto (2025) cerca de 339 mil habitantes, satisfazendo assim a população ao nível de quantidade e qualidade de água [38]. A empresa conta com cerca de 11 captações, 4 Estações de Tratamento de Água (ETA), 226 km de condutas, 31 estações elevatórias e 52 reservatórios. Na Figura 11 é possível observar as zonas de abrangência de abastecimento de água, localizando os dois atuais centros operacionais e o futuro centro operacional abrangendo os municípios de Penacova, Arganil, Vila Nova de Poiares e Góis.



**Figura 11 - Zonas de abrangência do abastecimento de água**

Relativamente às águas residuais, a Águas do Centro litoral recebe os efluentes dos municípios de Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro, Batalha, Cantanhede, Estarreja, Espinho, Ílhavo, Marinha Grande, Mira, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Ourém, Porto de Mós, Santa Maria da Feira, Soure e Vagos (Figura 12), abrangendo uma totalidade de 750 mil habitantes – equivalentes. A recolha e tratamento das águas residuais são realizados através de 67 ETAR, 849 km de emissários, 158 Estações Elevatórias (EE) e 2 emissários submarinos [38].



**Figura 12 - Zonas de abrangência do saneamento de água**

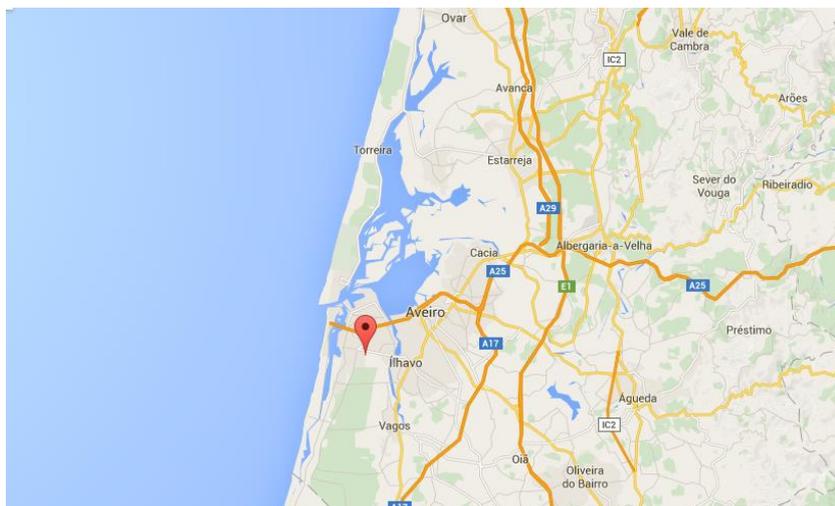
Em relação às áreas adjacentes à ria de Aveiro, antes da criação da AdCL, já outras entidades foram detentoras de competências semelhantes. A mais antiga remota a 1988 com a criação do Grupo de Trabalho da Ria de Aveiro (GRIA) que realizou o Plano Ria – Plano Integrado para a Resolução dos Problemas de Poluição na Ria de Aveiro. Mais tarde, após a sua extinção, a Associação de Municípios da Ria assume os trabalhos da GRIA. Em 1997, é constituída a SIMRIA com o objetivo de solucionar os problemas de saneamento existentes em redor da Ria de Aveiro. Em 2015, a SIMRIA cessa as suas funções ficando estas a cargo da AdCL (Tabela 5) (Silva, 2013)

**Tabela 5 – Histórico até à criação da AdCL**

1988	GRIA	Estudo da despoluição da ria de Aveiro
1992	AMRIA	Contribuir eficazmente para a resolução dos problemas de poluição da Ria
1997	SIMRIA	Implementar uma solução para os problemas de saneamento da Ria de Aveiro de forma a satisfazer as necessidades de recolha, tratamento e rejeição dos efluentes domésticos e industriais pertencentes ao Sistema Multimunicipal de Saneamento da Ria de Aveiro
2015	AdCL	Promover a concessão da exploração e da gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Centro Litoral de Portugal

### 3.2 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO - ETAR DE ÍLHAVO

A ETAR de Ílhavo situa-se na Gafanha da Encarnação, na zona industrial de Ílhavo, operando desde 2002. Esta ETAR foi criada com a finalidade de tratar os efluentes provenientes dos concelhos de Ílhavo, Mira, Vagos, Aveiro (parcial) e Cantanhede (parcial). Foi projetada para vir a tratar até 2018 um caudal médio de 39278 m<sup>3</sup> e 159 mil habitantes – equivalentes, e até 2038 um caudal médio de 46635 m<sup>3</sup> e 182 mil habitantes [10]. A Figura 13 apresenta a localização geográfica da ETAR de Ílhavo.



**Figura 13 – Localização da ETAR de Ílhavo. Fonte: Google Maps**

### 3.2.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DA ÁGUA RESIDUAL

O tratamento na ETAR é organizado segundo três linhas de tratamento distintas: linha de água, linha de lamas e linha de gás. O tratamento da água residual inicia-se com o pré-tratamento, seguido do tratamento primário e posteriormente do tratamento secundário através do processo de lamas ativadas. Deste tratamento resultam lamas que antes de serem encaminhadas para o seu destino final são submetidas ao processo de digestão anaeróbia após serem espessadas. Em seguida são desidratadas e armazenadas no silo. Durante a digestão anaeróbia é produzido biogás que é armazenado no gasómetro. Este biogás é utilizado nos motores de cogeração e nas caldeiras de água quente, sendo o excedente queimado [39].

Na Figura 14 encontra-se o diagrama da ETAR.

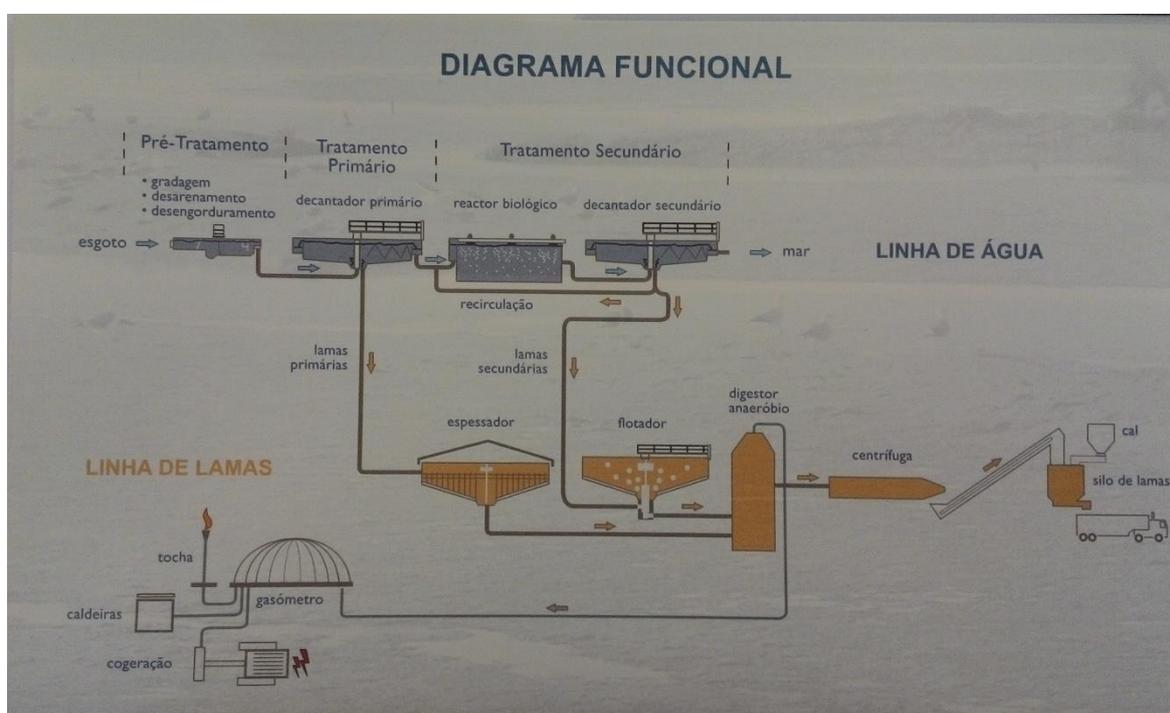


Figura 14 – Diagrama funcional da ETAR de Ílhavo

#### 3.2.1.1 TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA (LINHA DE ÁGUA)

- *Pré-tratamento*

O efluente chega à ETAR sendo encaminhado para a etapa de pré-tratamento. Esta etapa é constituída pelas operações de gradagem/tamisação, desarenamento e desgorduramento e a sua finalidade é proteger os processos e equipamentos

subsequentes de entupimentos, obstruções e estragos, reduzindo assim a necessidade de manutenção na ETAR [3].

Durante o processo de gradagem são retirados os materiais de maiores dimensões (tais como: latas, papéis, paus, etc.) do efluente evitando assim obstrução e entupimento nos equipamentos a jusante, aumentando assim a eficiência global do processo [3]. Estes sólidos são transportados através de um parafuso transportador-compactador e armazenados temporariamente em contentores para posteriormente serem encaminhados para um destino final adequado. Esta operação engloba além de uma grelha manual, dois tamisadores de grelhas automáticas que retêm os sólidos de menores dimensões, sendo por isso utilizados de forma complementar à gradagem [39].

O processo de desarenamento e desengorduramento são realizados simultaneamente através de dois canais retangulares. Relativamente ao desarenamento este tem como objetivo remover sedimentos como areias que não são removidas no processo anterior. As areias com maior granulometria por ação da gravidade depositam-se no fundo do canal. Em seguida, através de bombas instaladas sobre a ponte móvel, as areias são aspiradas e depositadas num contentor. Por fim, são enviadas para aterro.

No processo de desengorduramento são removidos óleos e gorduras presentes no efluente, através de um raspador de superfície [39].

- *Tratamento primário*

Depois do pré-tratamento, o efluente é encaminhado para a câmara de repartição, onde os caudais são divididos uniformemente para dois decantadores (do tipo circular, com 779 m<sup>2</sup> cada). A água residual é introduzida pela parte inferior do decantador, saindo por aberturas existentes na coluna central, a uma velocidade relativamente baixa para evitar turbulências. À medida que a água entra no decantador, por ação da gravidade, as partículas sedimentam no fundo do tanque e a água clarificada segue para a caixa de repartição do tratamento secundário. Deste processo resultam partículas sedimentadas - lamas primárias - que são arrastadas continuamente pelos raspadores de fundo, fixos a uma ponte giratória, sendo posteriormente encaminhadas para o tratamento da fase sólida. Além das lamas primárias resultam também escumas, que através de um sistema de varrimento superficial as concentra, sendo em seguida encaminhadas de volta para o pré-tratamento.

O principal objetivo desta etapa é retirar os sólidos em suspensão. Um correto e eficaz funcionamento desta fase permite reduzir entre 25 a 40% de CBO<sub>5</sub> e remover significativamente os sólidos sedimentáveis (50 a 70%). Além disso, conduz à diminuição

---

dos consumos energéticos e aos problemas de operação nos tratamentos biológicos [3], [39].

▪ *Tratamento secundário*

O efluente que se encontra na caixa de repartição é dividido e enviado para dois tanques biológicos, onde ocorre parte do tratamento secundário.

O tratamento secundário na ETAR de Ílhavo é realizado através de um sistema de lamas ativadas que se fundamenta no crescimento de biomassa suspensa no efluente e na sua posterior separação por gravidade. Assim, a sua finalidade é degradar a matéria orgânica dissolvida e coloidal existente na água residual, transformando-a em energia necessária para a produção de biomassa e para as atividades metabólicas [3].

As lamas ativadas encontram-se em dois tanques de arejamento onde é fornecido oxigénio e onde são misturados os microrganismos com a água residual. Os tanques de arejamento utilizados no caso de estudo são retangulares, ocupando cerca de 3882 m<sup>3</sup> cada um. Operam num regime de média carga e baixa idade das lamas [39].

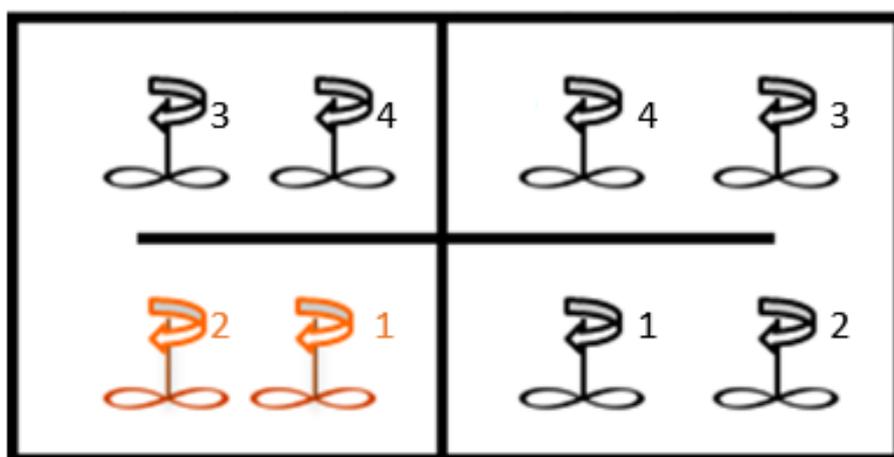
Para o fornecimento do oxigénio necessário para oxidar a matéria orgânica, o sistema dispõe de turbinas superficiais que permitem ainda uma mistura homogénea entre as lamas ativadas e a água residual [39]. Estas turbinas consistem essencialmente em pás dispostas de forma circular, parcialmente submersas e acionadas por motores. Através da sua rotação, a água é bombeada e projetada horizontalmente garantindo tanto a homogeneização da água residual como a oxigenação do meio. O funcionamento das turbinas é influenciado pela velocidade de rotação, diâmetro e grau de imersão [40].

Para satisfazer as necessidades de oxigénio no tanque de arejamento, a ETAR tem 8 turbinas (4 em cada tanque: 2 turbinas grandes, 2 médias e 4 pequenas). Na Figura 15 apresenta-se esquematicamente a distribuição destas turbinas. As turbinas nº1 têm uma potência de 55 kw, as turbinas nº2 têm 37 kw e as restantes apresentam 30 kw [39]. A nível de nomenclatura, o lado esquerdo é, doravante, designado por tanque A e o lado direito por tanque B. Os tanques são divididos em quatro setores:

- As turbinas 1 e 2 do tanque A constituem a zona A1;
- As turbinas 3 e 4 do tanque A constituem a zona A2;
- As turbinas 1 e 2 do tanque B constituem a zona B1;
- As turbinas 3 e 4 do tanque B constituem a zona B2;

No tanque de arejamento é utilizada uma abordagem de arejamento afunilado, isto é, o fornecimento de oxigénio é reduzido ao longo do comprimento do tanque. É por este motivo que na entrada do tanque a potência das turbinas é mais elevada visto que a carga orgânica mássica e as necessidades de  $O_2$  também o são [28].

Nas turbinas assinalas a laranja (Figura 15) foram instalados dois variadores de frequência, um em dezembro de 2014 e outro em dezembro de 2015. Ambos os variadores foram instalados no tanque A. Os variadores de frequência implicam uma variação na velocidade das turbinas, dado que a sua relação é proporcional. Assim, o aumento da frequência implica um aumento da velocidade na rotação das turbinas e a diminuição da frequência implica a diminuição da velocidade.



**Figura 15 - Esquema das turbinas do tanque de arejamento**

Por fim, o efluente procedente do tanque de arejamento é repartido e encaminhado, para dois decantadores secundários (circulares com  $1134 \text{ m}^2$  de área superficial). O funcionamento destes decantadores é análogo aos decantadores primários. Nesta etapa, os flocos biológicos (lamas secundárias) gerados são removidos e encaminhados para o tratamento da fase sólida, produzindo-se assim um efluente de qualidade com baixo teor de matéria orgânica e sólidos suspensos, pronto a ser lançado no meio recetor. Paralelamente, ainda no decantador secundário parte das lamas decantadas constituídas por microrganismos são recirculadas para o tanque de arejamento a fim de manter a eficiência do processo [3], [15].

---

### 3.2.1.2 TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA (LINHA DE LAMAS)

Do tratamento da água residual resultam as lamas provenientes da decantação primária e secundária. O seu tratamento inicia-se com o espessamento, sendo de seguida digeridas anaerobiamente e por último desidratadas.

- *Espessamento*

A ETAR dispõe de um sistema diferenciado para o espessamento das lamas, cujo objetivo é remover água das lamas de forma a reduzir o seu volume e aumentar a sua concentração [3]. As principais vantagens do espessamento são as seguintes:

- Diminuir a quantidade de calor necessário para aquecimento das lamas ativadas para o processo de digestão anaeróbia;
- Redução dos produtos químicos para o acondicionamento e estabilização das lamas;
- Reduz a diminuição do equipamento de desidratação.

As lamas primárias são acumuladas nos decantadores primários, onde são extraídas pelo fundo e enviadas para os espessadores gravíticos. No que diz respeito as lamas secundárias, uma parte é recirculada novamente para o tanque biológico, e o excesso é extraído e encaminhado para o flotor de ar dissolvido (DAF).

Desta forma, as lamas primárias são espessadas por gravidade e as lamas secundárias são espessadas por ar dissolvido. As primeiras, que não foram submetidas a tratamento secundário, libertam facilmente água da sua constituição espessando bem. Já as lamas secundárias, mais homogéneas e flocculantes, são mais difíceis de desidratar. Por este motivo opta-se pela diferenciação no que toca ao processo de espessamento, de forma a otimizar o mesmo, consoante as características das lamas, obtendo-se no final, lamas mistas com maior concentração de sólidos.

A ETAR dispõe de 2 espessadores gravíticos, com 10 metros de diâmetro e uma capacidade unitária de 276 m<sup>3</sup> e um flotor [39].

Posteriormente as lamas espessadas são encaminhadas para uma câmara de 15 m<sup>3</sup>, sendo mantidas em constante agitação para evitar a sua deposição [39]. Esta mistura facilita a sua homogeneização, aumentando significativamente a eficiência durante o processo anaeróbio[3].

- *Digestão anaeróbia*

De um modo geral, a digestão anaeróbia é o método mais utilizado em ETAR que têm sistemas de lamas ativadas [3]. O caso de estudo apresenta 2 digestores anaeróbios com 3000 m<sup>3</sup> de volume, embora atualmente apenas um esteja em funcionamento. O digestor é aquecido através de um sistema de digestão de biogás comprimido. Para isso cada um dos digestores apresenta permutadores de calor água-lamas, bombas de recirculação e caldeiras de aquecimento de água [39].

A digestão anaeróbia das lamas é um processo que ocorre na ausência de oxigénio reduzindo a concentração de sólidos na fração volátil. Isto permite diminuir o poder de putrefação e o volume das lamas. Como produtos deste processo obtém-se lamas estabilizadas e biogás [3].

As lamas após serem espessadas são bombeadas para o digestor anaeróbio. O processo ocorre eficientemente em regime mesófilo (~35°C), sendo por isso necessário aquecimento durante a digestão. Assegurando uma temperatura constante, há um aumento do crescimento dos microrganismos, da taxa de digestão e da produção de biogás[3].

- *Desidratação das lamas*

Esta etapa tem como finalidade remover humidade das lamas, reduzindo assim o seu volume e os custos associados ao destino final. É adicionado às lamas um polímero para que os sólidos agreguem-se mais facilmente promovendo a separação mais eficientemente entre a água e as lamas. No caso de estudo são utilizadas centrifugadoras e as escorrências resultantes do processo são enviadas para a obra de entrada [39].

- *Armazenamento das lamas*

Após os processos descritos anteriormente, as lamas são elevadas através de uma bomba e um parafuso sem fim até ao silo de armazenamento (100 m<sup>3</sup>). Posteriormente são encaminhadas para compostagem.

### **Tratamento da fase gasosa (linha de gás)**

O biogás produzido é armazenado num gasómetro. O gasómetro é do tipo membrana com uma capacidade de 1720 m<sup>3</sup> permitindo um armazenamento de cerca de 8,5 horas. A pressão dos digestores é suficiente para impulsionar o biogás para o gasómetro. O biogás produzido é utilizado nos motores de cogeração e para aquecimento de águas nas caldeiras. A energia eléctrica produzida é vendida à rede e o excesso de biogás queimado numa tocha [39].

---

## Legislação

Os requisitos legais relativos ao tratamento de águas residuais são assentes em padrões de qualidade transpostos para valores de limite máximos permitidos, para que os efluentes sejam descarregados no meio aquático recetor com segurança.

A ETAR de Ílhavo possui uma licença para a utilização dos recursos hídricos nomeadamente para a rejeição de águas residuais, com limites de descarga mais restritos que o Decreto-Lei nº.98/236.

Na Tabela 6 encontram-se os valores de concentrações máximos para a descarga de águas residuais.

**Tabela 6 – Valores limite de emissão na descarga de águas residuais (Licença de utilização dos recursos hídricos – rejeição de águas residuais)**

Parâmetro	Expressão dos resultados	Licença
pH	Escala de Sorensen	6.0 – 9.0
CBO <sub>5</sub>	mg/L	25
Temperatura	°C	Aumento de 3
CQO	mg/L	125
SST	mg/L	60
Fosforo total	mg P/L	10
Azoto total	mg N/L	15



---

## **4 METODOLOGIA**

No âmbito do estágio curricular realizado na ETAR de Ílhavo, foram estabelecidos três objetivos principais:

- Avaliação do funcionamento do sistema de tratamento biológico pelo processo de lamas ativadas;
- Análise do funcionamento do sistema de arejamento do tratamento por lamas ativadas através do estudo do seu algoritmo e possível proposta de alteração, tendo em vista a sua otimização;
- Análise energética referente ao tratamento secundário e, especificamente, das turbinas utilizadas para o arejamento deste sistema.

### **4.1 AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE LAMAS ATIVADAS**

O funcionamento do sistema de lamas ativadas foi estudado recorrendo à análise dos parâmetros apresentados na Tabela 7, que foram agrupados segundo três objetivos específicos: avaliação da eficiência do tratamento secundário da ETAR; análise dos parâmetros de funcionamento do processo de lamas ativadas; e cumprimento dos VLE da licença para a rejeição de águas residuais.

Todos os dados utilizados nos cálculos necessários para a análise do funcionamento do sistema de lamas ativadas são referentes ao ano 2015, tendo sido fornecidos pela direção da ETAR de Ílhavo. Estes dados são provenientes de análises laboratoriais realizadas por uma técnica da empresa, no laboratório existente nas instalações que é certificado para esse efeito.

**Tabela 7 - Parâmetros analisados no funcionamento do sistema de lamas ativadas**

Parâmetros
Avaliação da eficiência do tratamento secundário da ETAR
Remoção CQO (%)
Remoção SST (%)
Remoção de CBO <sub>5</sub> (%)
Análise dos parâmetros operacionais do sistema de lamas ativadas
Caudal efluente tratado [m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ]
Carga orgânica mássica (A/M) [kg CBO.kgVSS <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> ]
Carga orgânica volúmica [kg CBO.m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> ]
Sólidos Suspensos Totais (SST) [mg.L <sup>-1</sup> ]
Tempo de retenção hidráulico (TRH) [h]
Tempo de retenção de sólidos (TRS) [d]
Oxigénio dissolvido [ppm]
Índice volumétrico de lamas [mL.g <sup>-1</sup> ]
Cumprimento dos VLE da licença para rejeição de águas residuais
CQO [mg.L <sup>-1</sup> ]
SST [mg.L <sup>-1</sup> ]
CBO <sub>5</sub> [mg.L <sup>-1</sup> ]

#### 4.1.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO SECUNDÁRIO DA ETAR

A eficiência de tratamento ao nível secundário recai principalmente na análise da percentagem de remoção de CQO, SST e CBO<sub>5</sub> do tratamento secundário da ETAR. Estes parâmetros foram calculados de acordo com as equações 3, 4 e 5. Para o cálculo destes parâmetros utilizou-se valores médios mensais.

##### i. Remoção de CQO

$$\% \text{ Remoção de CQO} = \frac{CQO_{\text{entrada}} - CQO_{\text{saída}}}{CQO_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (3)$$

##### ii. Remoção de SST

$$\% \text{ Remoção de SST} = \frac{SST_{\text{entrada}} - SST_{\text{saída}}}{SST_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (4)$$

---

iii. Remoção de  $CBO_5$

$$\% \text{ Remoção de } CBO_5 = \frac{CBO_5 \text{ entrada} - CBO_5 \text{ saída}}{CBO_5 \text{ entrada}} \times 100 \quad (5)$$

#### 4.1.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE LAMAS ATIVADAS

Relativamente aos parâmetros operacionais, foram analisados os seguintes: o caudal, a carga orgânica mássica (A/M), a carga orgânica volúmica, a concentração de sólidos, o tempo de retenção hidráulico (TRH), o tempo de retenção de sólidos (TRS), o oxigénio dissolvido (OD) e o índice volumétrico de lamas (IVL).

##### 4.1.2.1 CAUDAL DE EFLUENTE TRATADO

Os valores referentes ao caudal de efluente tratado são adquiridos de forma automática, por caudalímetros à saída da ETAR. Para o estudo utilizaram-se médias mensais. Paralelamente, analisou-se a variação do caudal à saída da ETAR em função da precipitação. Os dados da precipitação foram obtidos dos boletins meteorológicos do IPMA (Instituto português do mar e da atmosfera).

##### 4.1.2.2 CARGA ORGÂNICA MÁSSICA

A carga orgânica mássica foi calculada de acordo com a equação (6):

$$\frac{A}{M} \left[ \frac{kg \ CBO}{kg \ VSS \cdot d} \right] = \frac{Q \times S_i}{V \times X} \left[ \frac{m^3 \cdot d^{-1} \times kg \ CBO}{m^3 \times kg \ VSS} \right] \quad (6)$$

Onde  $X$  corresponde à concentração de sólidos suspensos voláteis (indicativo da quantidade de microrganismos presentes nos tanques);  $S_i$  à concentração de matéria orgânica na entrada do sistema de lamas ativadas;  $Q$  ao caudal que entra no sistema biológico; e  $V$  corresponde ao volume (7764 m<sup>3</sup>). Para o cálculo deste parâmetro utilizaram-se médias mensais.

##### 4.1.2.3 CARGA ORGÂNICA VOLÚMICA

A carga orgânica volúmica foi calculada de acordo com a equação (7):

$$\text{Carga orgânica volúmica} [kg \ CBO \cdot m^{-3} d^{-1}] = \frac{Q \times S_i}{V} \left[ \frac{m^3 \cdot d^{-1} \times kg \ CBO \cdot m^{-3}}{m^3} \right] \quad (7)$$

Onde  $S_i$  à concentração de substrato na entrada do sistema de lamas ativadas;  $Q$  ao caudal que entra no sistema biológico; e  $V$  corresponde ao volume (7764 m<sup>3</sup>). Todos os valores utilizados no cálculo da carga orgânica são referentes a médias mensais.

#### 4.1.2.4 CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

Foram utilizados os valores médios mensais de sólidos suspensos totais provenientes das amostragens realizadas no laboratório da ETAR, por uma técnica, durante o ano 2015.

#### 4.1.2.5 TEMPO DE RETENÇÃO DE SÓLIDOS (TRS)

O tempo de retenção de sólidos, também conhecido como idade das lamas foi calculado de acordo com a equação (8):

$$TRS [d] = \frac{V \times X}{Q_e \times X_e + Q_w \times X_w} \left[ \frac{m^3 \times kg \ VSS.m^3}{m^3.d^{-1} \times kg \ VSS.m^{-3} + m^3.d^{-1} \times kg \ VSS.m^{-3}} \right] \quad (8)$$

Onde  $V, X$  e  $Q$  significam volume, concentração de SSV e caudal, respetivamente. E os subscritos  $e$  e  $w$  significa que é referente ao efluente final ou à da purga de lamas respetivamente. Os valores utilizados são referentes a médias mensais.

#### 4.1.2.6 TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO (TRH)

O tempo de retenção hidráulico foi calculado de acordo com a equação (9):

$$TRH [h] = \frac{V}{Q} \left[ \frac{m^3}{m^3.d^{-1}} \times \frac{24h}{d} \right] \quad (9)$$

Onde  $V$  é o volume total dos tanques de arejamento (7764 m<sup>3</sup>) e  $Q$  o caudal que chega aos tanques.

#### 4.1.2.7 OXIGÉNIO DISSOLVIDO (OD)

Foram utilizados os valores médios mensais de oxigénio dissolvido, que são adquiridos através de sondas, localizadas dentro dos tanques de arejamento. Estes valores são adquiridos automaticamente pelo sistema de controlo. Paralelamente, conjugou-se a variação do oxigénio dissolvido com o tempo de funcionamento das turbinas (médias diárias mensais).

---

#### 4.1.2.8 ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LAMAS (IVL)

Os dados mensais, para 2015, do Índice volumétrico de lamas foram fornecidos pela direção da ETAR.

#### 4.1.3 CUMPRIMENTO DOS VLE DA LICENÇA PARA REJEIÇÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Como anteriormente referido, a ETAR possui uma licença para a utilização dos recursos hídricos nomeadamente para a rejeição de águas residuais, com limites de descarga mais restritos que o DL 98/236, já apresentados na Tabela 6.

Utilizaram-se os valores de CQO, CBO e SST, resultantes das análises laboratoriais executadas nas instalações da ETAR, fornecidos pela direção da mesma. As análises são realizadas quinzenalmente, e foram utilizadas todas as análises efetuadas ao longo do ano, para a avaliação do cumprimento dos requisitos legais.

## 4.2 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AREJAMENTO DAS LAMAS ATIVADAS

Na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros analisados para o estudo do funcionamento das turbinas, agrupados segundo três objetivos específicos, sendo estes: análise do funcionamento do sistema de arejamento; proposta de um novo algoritmo, caso se verifique que o atual não é adequado; e elaboração de uma nota técnica sobre o novo funcionamento do sistema de arejamento, a entregar tanto à direção da ETAR de Ílhavo como aos operadores, de forma a facilitar a compreensão e operação do sistema.

**Tabela 8 – Parâmetros analisados para o estudo do funcionamento do sistema de arejamento**

Parâmetros
Análise do funcionamento do sistema de arejamento
Desenvolvimento de um algoritmo que transcreva o funcionamento das turbinas e que tem por base as instruções de funcionamento (criado pela empresa PRIDESA)
Análise da integridade do algoritmo da PRIDESA
Proposta de alteração do algoritmo caso se verifique que o atual não é adequado
Criação e implementação de um novo algoritmo considerando novos tempos e set-points
Desenvolvimento de uma nota técnica
Elaboração de uma nota técnica sobre o novo funcionamento do sistema de arejamento

#### 4.2.1 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AREJAMENTO

Inicialmente, foram analisadas as instruções desenvolvidas pela empresa PRIDESA, sobre o funcionamento das turbinas de arejamento. Em seguida, procedeu-se à sua representação em diagrama (algoritmo base). Posteriormente, foram realizados pequenos testes operacionais de forma a tentar apurar-se, se neste momento, o sistema de arejamento está a funcionar de acordo com essas instruções ou se já tinha sofrido alterações. Procedeu-se ainda à análise dos consumos associados, para o ano 2015. Por último, verificando-se que o algoritmo implementado não era o mais adequado, criou-se e implementou-se um novo.

##### 4.2.1.1 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO BASE

Tendo por base as instruções de funcionamento do equipamento de arejamento (turbinas) criadas pela empresa PRIDESA e da instalação para o tratamento biológico (ver Anexo A), foi construído um algoritmo (em forma de diagrama) que representa-se este funcionamento.

A finalidade desta tarefa foi traduzir de uma forma mais clara e acessível o funcionamento do sistema de arejamento, facilitando assim a rápida compreensão. O algoritmo base obtido permitiu ainda perceber o funcionamento das turbinas, assim como os seus tempos de paragem e os *set-points* escolhidos para o nível de OD.

#### 4.2.1.2 ANÁLISE DA INTEGRIDADE DO ALGORITMO BASE

Após o desenvolvimento do algoritmo base que descrevesse as instruções de funcionamento das turbinas de arejamento, tornava-se fundamental perceber se este traduzia a realidade. Neste sentido, foi feita uma análise, alterando diferentes campos (Figura 16). Esta etapa foi concretizada através da utilização do programa de gestão (medição em tempo real e em contínuo de todas as variáveis relevantes) utilizado na ETAR (Figura 17).

Todos os parâmetros tais como os valores de *set-point* dos níveis de OD e os tempos  $t_1, t_2, t_3$  e  $t_4$  (tempos de funcionamento e paragem previsto no algoritmo de funcionamento do sistema de arejamento da PRIDESA) são possíveis de serem alterados. O programa permite ainda criar gráficos da concentração do oxigénio dissolvido em função do tempo, no tanque de arejamento, igualmente em tempo real.

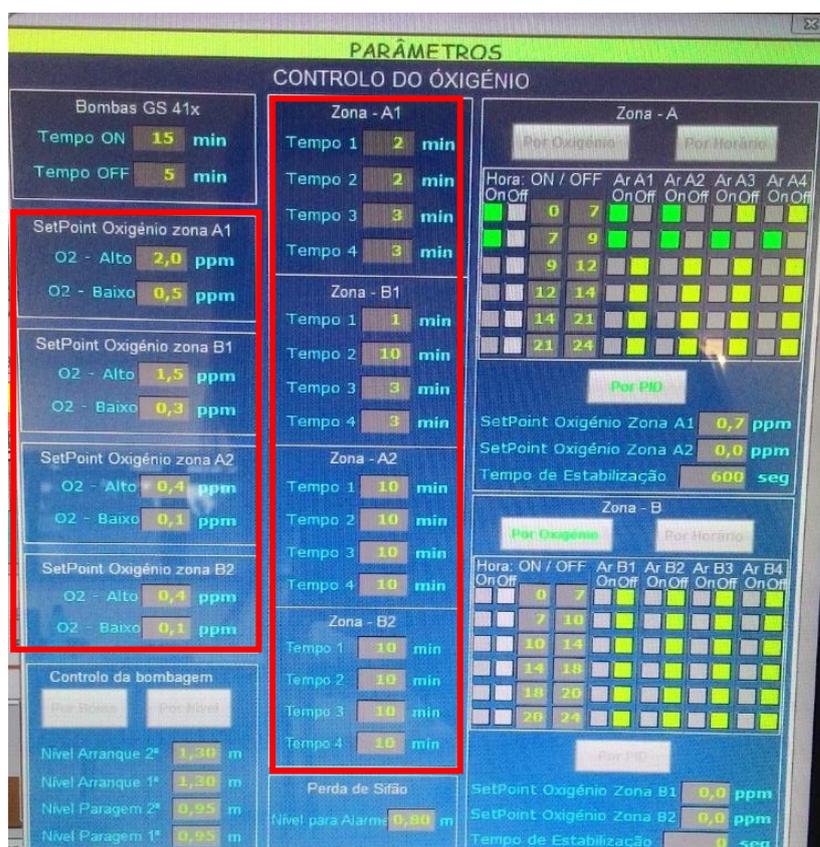
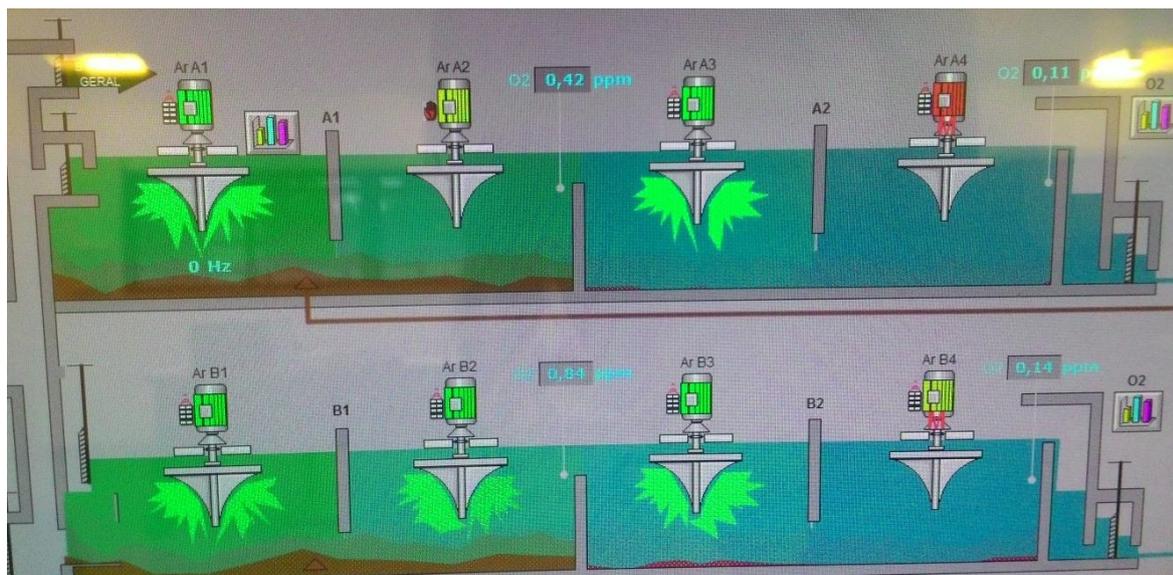


Figura 16 – Parâmetros de controlo do oxigénio dissolvido



**Figura 17 – Aspeto do programa de monitorização do sistema de arejamento**

Posto isto, realizaram-se 3 alterações nos campos do tempo  $t_1$  e  $t_2$  (minutos). Os campos  $t_3$  e  $t_4$  mantiveram-se constantes e iguais a 3 minutos (Tabela 9). Após cada alteração cronometrou-se o tempo de paragem e arranque das turbinas 1 e 2.

**Tabela 9 – Alterações efetuadas ao tempo de funcionamento das turbinas**

Alteração	Tempos [min]
<b>Alteração 1</b>	$t_1 = 2, t_2 = 2, t_3 = 3, t_4 = 3$
<b>Alteração 2</b>	$t_1 = 2, t_2 = 5, t_3 = 3, t_4 = 3$
<b>Alteração 3</b>	$t_1 = 1, t_2 = 2, t_3 = 3, t_4 = 3$

#### 4.2.2 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO ALGORITMO

##### 4.2.2.1 CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO ALGORITMO

Após a análise do algoritmo que teve por base as instruções da PRIDESA, foram desenvolvidos dois algoritmos que fossem mais eficientes, e que considerassem:

- Algoritmo 1 – Concentração de oxigénio dissolvido máximo, mínimo e set-point de gestão. Existem variadores de frequência nas turbinas 1 e 2 do tanque biológico A. Os variadores permitem que as turbinas oscilem a sua frequência numa determinada gama. Neste caso específico foi entre 28 e 50 Hz.
- Algoritmo 2 – Concentração de oxigénio dissolvido máximo e mínimo;

Para ambos os algoritmos, o objetivo primordial focou-se na otimização do sistema de arejamento. Pretende-se para isso:

- 
- Construção do mesmo seguimento lógico do algoritmo base, com tempos equiparáveis;
  - Diminuição das paragens e arranques das turbinas para que pudesse haver uma poupança mecânica dos equipamentos;
  - Alteração da nomenclatura do programa para que seja mais perceptível o significado de cada tempo e set-point, para qualquer utilizador;
  - Desenvolvimento de uma nota técnica com ambos os algoritmos para facilitar a leitura em modo diagrama;

#### 4.2.3 DESENVOLVIMENTO DE UMA NOTA TÉCNICA

Envolve a elaboração de uma nota técnica sobre o novo funcionamento do sistema, a entregar na tanto na direção da ETAR de Ílhavo como aos operadores, de forma a facilitar a compreensão e operação do sistema.

Esta nota técnica terá a seguinte estrutura:

- Breve descrição sobre o sistema de arejamento do processo de lamas ativadas;
- Caracterização do tanque de arejamento, com a indicação do esquema das turbinas, bem como aquelas que possuem variador de frequência;
- Descrição do funcionamento dos algoritmos e nomenclatura;
- Diagramas de ambos os algoritmos;

### 4.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO TRATAMENTO SECUNDÁRIO

Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros analisados para o estudo energético do tratamento secundário agrupados em três objetivos específicos, sendo estes o estudo energético do tratamento secundário (2015); estudo energético do funcionamento das turbinas do sistema de arejamento; e o estudo do funcionamento das turbinas após a implementação do novo algoritmo através da realização de uma campanha de amostragem;

**Tabela 10 – Parâmetros para o estudo do funcionamento energético**

<b>Parâmetros</b>
<b>Estudo dos consumos no tratamento secundário</b>
Energia consumida no tratamento secundário [kW/d] Indicador: energia consumida no tratamento secundário / energia consumida na ETAR
<b>Estudo dos consumos das turbinas</b>
Energia consumida pelas turbinas [kW/d] Indicador: energia consumida pelas turbinas / energia consumida no tratamento secundário Indicador: energia consumida pelas turbinas / energia consumida na ETAR Custos associados às turbinas
<b>Estudo do funcionamento das turbinas – Campanha de amostragem</b>
Condições base Variação dos níveis de oxigénio dissolvido Análise da influência da frequência de rotação do motor da turbina na concentração do oxigénio dissolvido Análise da influência frequência de rotação do motor da turbina na energia consumida

#### 4.3.1 ESTUDO DOS CONSUMOS NO TRATAMENTO SECUNDÁRIO

##### 4.3.1.1 ENERGIA CONSUMIDA NO TRATAMENTO SECUNDÁRIO [KW/D]

Os dados relativos à energia consumida pelo tratamento secundário foram adquiridos por um analisador de energia contínuo, localizado nas instalações da ETAR, estando o mesmo aferido para o efeito, pela última vez em Setembro de 2014 (Figura 18). Estes analisadores fazem a medição da energia associada a todo o tratamento secundário, englobando a energia despendida no funcionamento das turbinas, na recirculação, nas lamas em excesso, nas pontes dos decantadores secundários, nos flutuantes secundários e no poço de drenagem.

A análise teve por base o ano de 2015, tendo sido realizadas médias mensais para o referido ano.



**Figura 18 – Analisador de energia do tratamento secundário**

#### 4.3.1.2 INDICADOR DE ENERGIA

De forma a se compreender quanto é que os consumos associados ao tratamento secundário representam nos consumos da ETAR, desenvolveu-se o seguinte indicador:

$$\frac{\text{Energia consumida no tratamento secundário}}{\text{Energia consumida na ETAR}}$$

#### 4.3.2 ESTUDO DOS CONSUMOS NAS TURBINAS

##### 4.3.2.1 ENERGIA CONSUMIDA NAS TURBINAS

Tal como já foi referido, não existem medições específicas para as turbinas. Por este motivo, recorreu-se à medição instantânea da potência através de uma pinça digital.

Para se proceder à estimativa dos custos associados às turbinas para o ano 2015 realizou-se o seguinte procedimento:

1 – Cálculo da potência elétrica

$$P [W] = U [V] \times I [A] \times \cos(\phi) \quad (10)$$

Onde  $P$  corresponde à potência elétrica, em Watt;  $U$  corresponde à tensão, em Volt;  $I$  corresponde à intensidade da corrente, em Amperes; e  $\cos(\phi)$  corresponde ao fator de

potência. Para se obterem estes parâmetros,  $U$ ,  $I$  e  $\phi$  utilizou-se uma pinça digital (*Digital Clamp Multimeters* - Figura 19) que permite verificar os consumos instantâneos de vários parâmetros energéticos. A pinça utilizada é da marca UNI-T (UT 203/204). Para efeitos académicos utilizaram-se valores dos parâmetros adquiridos, neste estágio, em Março de 2016.



**Figura 19 – Pinça digital (digital clamp multimeters)**

2 – Consumo das turbinas, em kWh

Com a equação (10) obteve-se a potência em W. O produto entre a potência e as horas de funcionamento de cada turbina resulta neste parâmetro em kWh (Equação (11)).

$$P [W] \times \text{horas de funcionamento} [h] \times 10^{-3} \frac{[kW]}{[W]} = P [kWh] \quad (11)$$

#### 4.3.2.2 INDICADORES

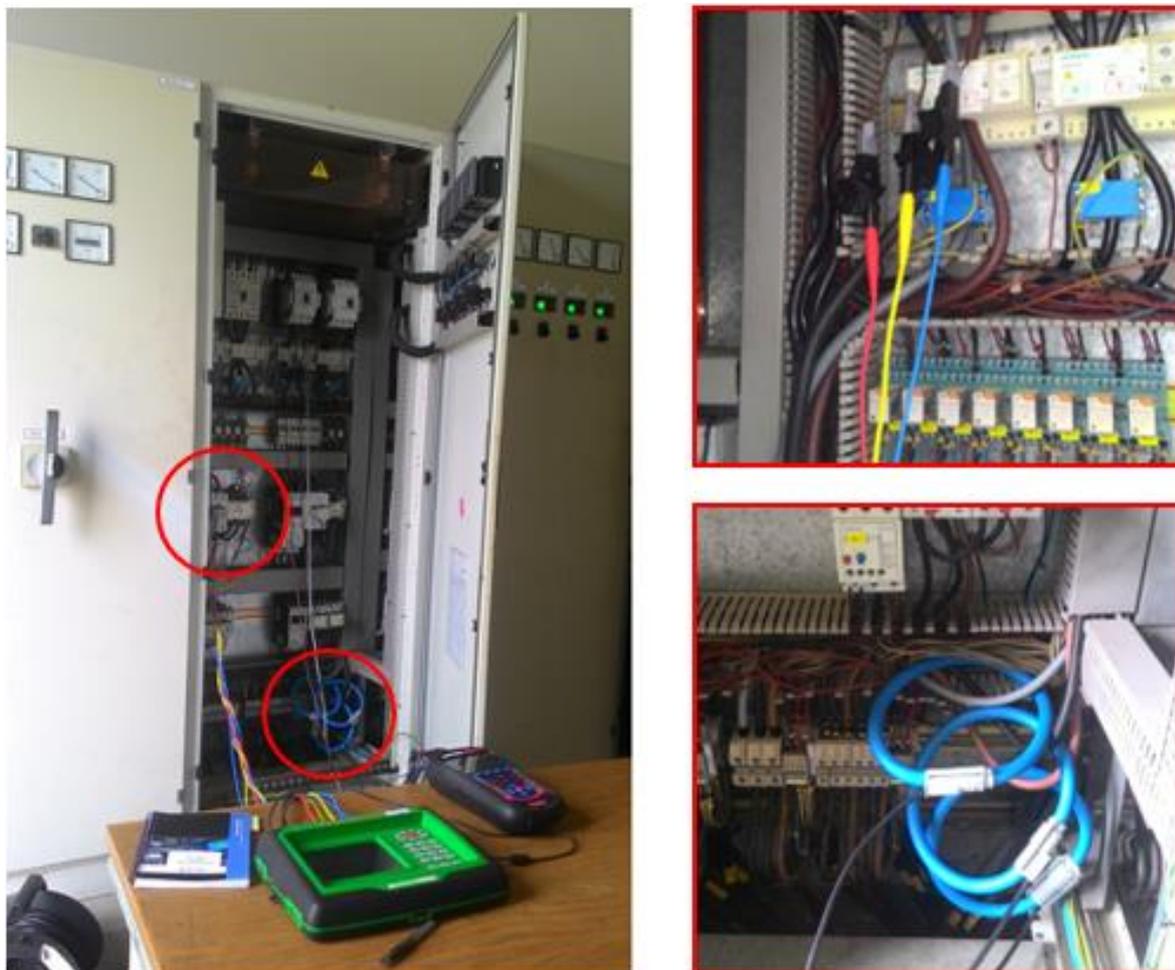
De forma a se compreender quanto é que os consumos associados ao tratamento secundário representam nos consumos da ETAR, desenvolveram-se os seguintes indicadores:

$$\frac{\text{Energia consumida nas turbinas}}{\text{Energia consumida no tratamento secundário}}$$

$$\frac{\text{Energia consumida nas turbinas}}{\text{Energia consumida na ETAR}}$$



A montagem experimental foi realizada na sala de quadros elétricos da ETAR (Figura 22).



**Figura 22 - Montagem experimental**

O período selecionado para a campanha de amostragem foi nos dias 25 e 26 de Junho de 2016. Os equipamentos efetuaram a medição em contínuo, com aquisição de valores de 1 em 1 minuto. O parâmetro analisado foi a energia ativa.

Apresentam-se ainda os valores para SST, CQO e CBO, monitorizadas nas semanas precedentes à campanha de amostragem, bem como a temperatura média.

#### 4.3.3.2 VARIAÇÃO DOS NÍVEIS DE OXIGÉNIO DISSOLVIDO

Foram adquiridos os valores do nível de OD medidos instantaneamente pelas sondas de oxigénio, através do programa de monitorização e gestão da ETAR. Para o mesmo período de tempo foi efetuado o registo das horas (acumuladas) de funcionamento de todas

---

as turbinas, sendo este registo realizado manualmente para as seguintes horas: 00:00, 08:00 e 16:00.

#### 4.3.3.3 ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO DO MOTOR DA TURBINA EM FUNÇÃO DO OXIGÉNIO E DA ENERGIA CONSUMIDA

Os resultados energéticos foram analisados através de médias horárias, cruzando com a informação dos consumos associados ao funcionamento das turbinas com a variação da frequência e do oxigénio dissolvido.



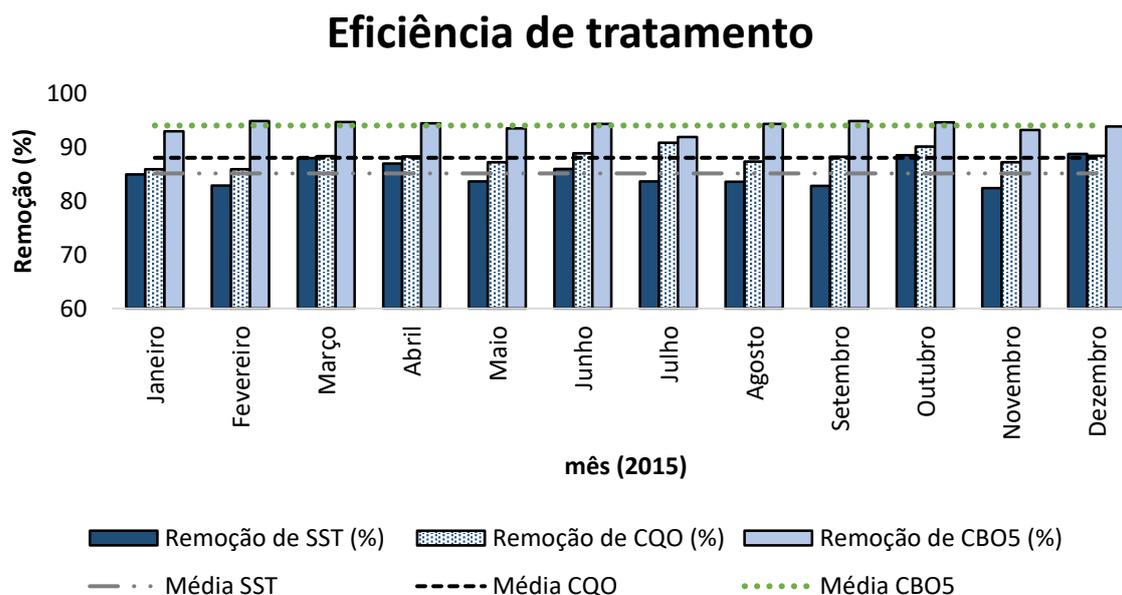
## 5 RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE LAMAS ATIVADAS

#### 5.1.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO

Através das equações (3), (4) e (5) foi analisado a eficiência de tratamento da água residual através da percentagem de remoção de SST, CQO e CBO<sub>5</sub> durante o processo de tratamento secundário por lamas ativadas. Os resultados obtidos encontram-se ilustrados na Figura 23.

Ambos os parâmetros caracterizam-se por eficiências de tratamento elevadas, nomeadamente acima dos 80 %. A nível anual (2015), a remoção de SST foi 85 %, de CQO foi 88% e de CBO<sub>5</sub> foi de 94 %.



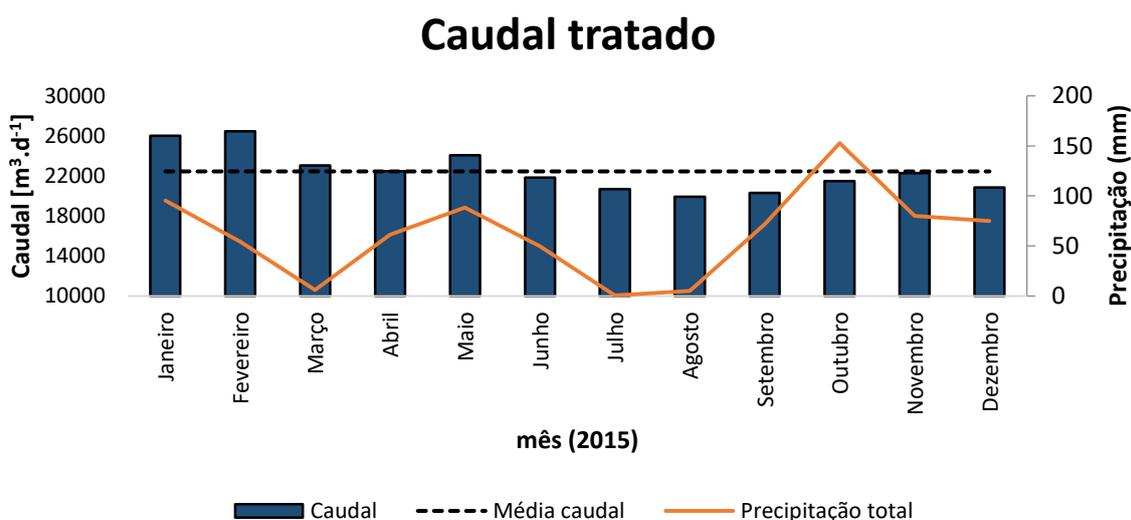
**Figura 23 – Eficiência de remoção do SST, CQO e CBO<sub>5</sub> das águas residuais durante o tratamento**

## 5.1.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

### 5.1.2.1 CAUDAL TRATADO

A ETAR de Ílhavo, tal como referido anteriormente, foi projetada para em 2018 vir a tratar aproximadamente um caudal de 39278 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. No ano de 2015, a ETAR tratou, em média, cerca de 22440 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, estando portanto neste momento a tratar cerca de 57 % do horizonte de projeto. A discrepância apresentada deve-se principalmente a três factos, designadamente: infraestruturas não finalizadas; ligações à rede de esgotos não concluídas; e quando a ETAR foi projetada foram consideradas capitações demasiado elevadas para a atualidade, fazendo com que o caudal no estimado no horizonte de projeto fosse demasiado elevado.

Na Figura 24 é possível observar a variação do caudal tratado bem como a precipitação total para cada mês ao longo do ano 2015. Na prática, numa escala horária ou diária, quando há de picos de pluviosidade verifica-se imediatamente um aumento no caudal que aflui a ETAR. Nestas situações, e se for detetado um aumento de SST à saída do tratamento (medição em tempo real e em contínuo) é aberto um *bypass* parcial à ETAR, para que não seja excedida a carga hidráulica admissível no decantador secundário. Numa base mensal, não é perceptível esta ligação direta entre o aumento do caudal que aflui a ETAR e a precipitação. Os meses com registo de maior caudal por dia são janeiro e fevereiro, sendo estes cerca de 13 e 15 % superiores à média anual, respetivamente, pelo que não é muito relevante.



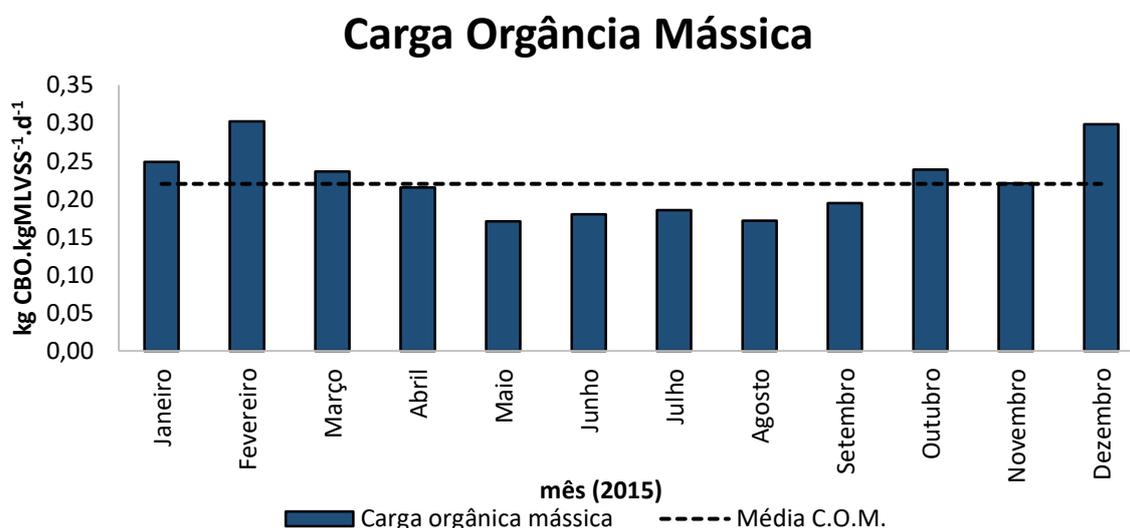
**Figura 24 - Caudal tratado na ETAR e precipitação, no ano 2015**

### 5.1.2.2 CARGA ORGÂNICA MÁSSICA

A carga orgânica mássica, também conhecida por relação A/M resulta do quociente entre o caudal mássico de substrato alimentado e a quantidade de biomassa contida no reator, calculada de acordo com a equação (6).

Tal como se pode verificar na Figura 25, a carga orgânica mássica foi em média 0,22 kg CBO.kgVSS<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>. Entre maio e setembro a média mensal foi significativamente mais baixa. Em particular, maio e agosto apresentam um valor médio de 0,17 kg CBO.kgVSS<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, cerca de 23 % inferior em relação à média anual. Por outro lado, fevereiro e dezembro excedem a média em 30%.

De acordo com o resultado obtido, este sistema pode classificar-se como um sistema de lamas ativadas de média carga. Tipicamente, para um sistema de média carga, a carga orgânica mássica varia entre 0,2 e 0,4 kg CBO.kgVSS<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>. Uma carga orgânica mássica baixa, implica que os microrganismos estejam num ambiente em que o alimento é relativamente escasso. A partir do momento em que se torna um fator limitante, a taxa metabólica dos microrganismos decai rapidamente, entrando numa fase de respiração endógena, com lise celular e nova síntese. Isto leva a que a oxidação da matéria orgânica seja praticamente completa, sendo também benéfica para a sedimentação e floculação das lamas.



**Figura 25 – Carga orgânica mássica durante o ano de 2015**

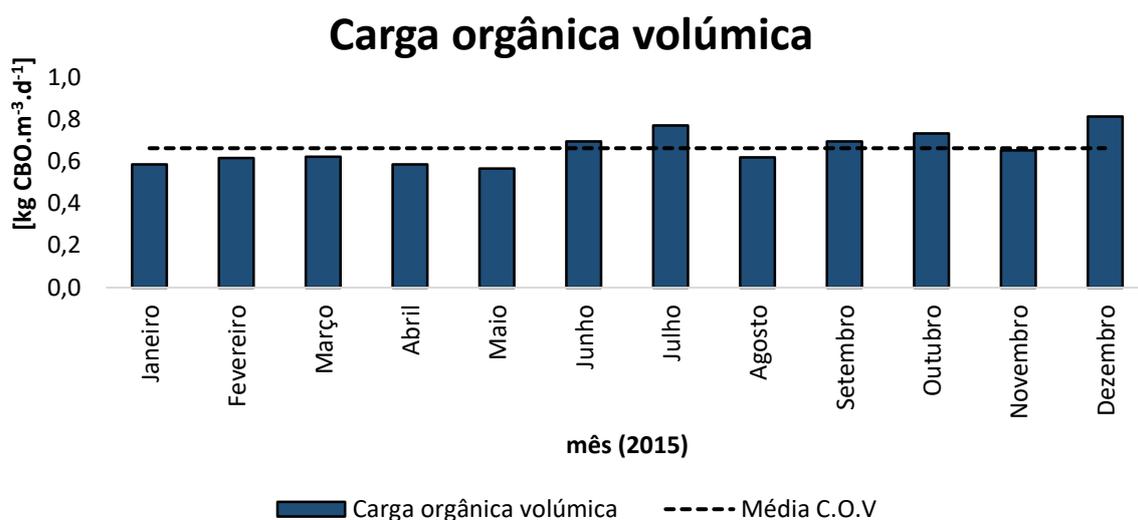
A ETAR foi projetada para vir a tratar no horizonte de projeto 0,27 kg CBO.kgVSS<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>, estando portanto a tratar 81 % do horizonte de projeto no que diz respeito à carga.

### 5.1.2.3 CARGA ORGÂNICA VOLÚMICA

A carga orgânica volúmica foi calculada em termos de  $\text{kg CBO}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  de acordo com a equação (7). Representa a quantidade de matéria orgânica aplicada ao sistema de lamas ativadas, por  $\text{m}^3$  e por dia.

Como se pode verificar na Figura 26 não há variações significativas em relação à média, o que significa a carga foi aproximadamente constante ao longo do ano. Durante o ano de 2015, este parâmetro oscilou entre 0,6 e 0,8  $\text{kg CBO}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ , sendo o valor médio de 0,675  $\text{kg CBO}\cdot\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ , encontrando-se no limiar superior da gama para o reator PFR e dentro da gama para o reator CSTR.

Este resultado é concordante como o resultado obtido para a carga orgânica mássica, evidenciando tratar-te de um sistema de lamas ativadas de média carga.



**Figura 26 – Carga orgânica volúmica, durante o ano de 2015**

### 5.1.2.4 CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

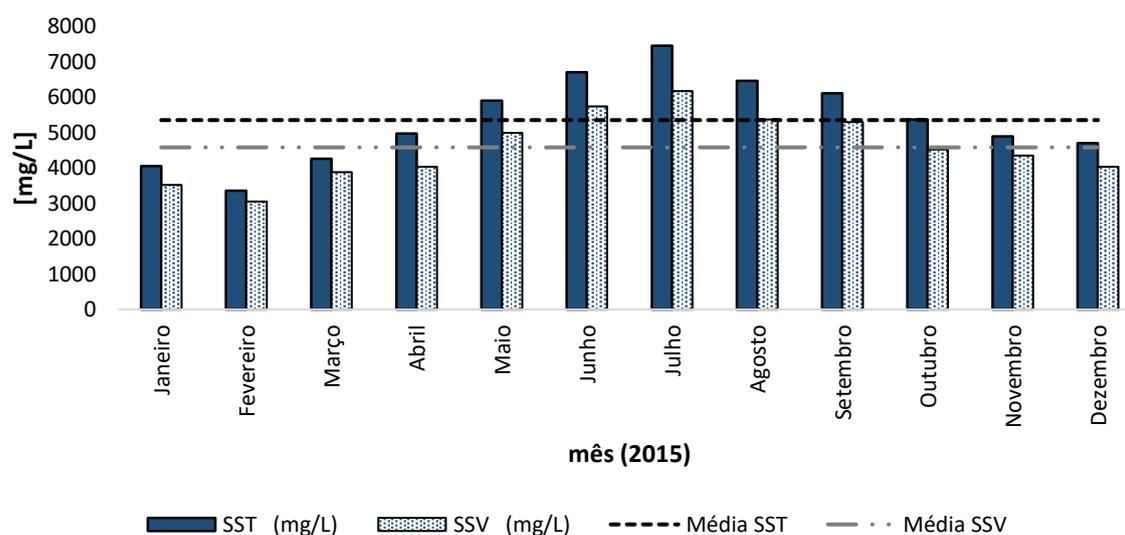
Na Figura 27 encontra-se a concentração de sólidos suspensos totais (MLSS) e voláteis (MLVSS) no reator biológico de lamas ativadas. A média anual de MLSS foi de  $5356 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  e de MLVSS foi de  $4585 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . É possível constatar que entre maio e setembro este parâmetro esteve acima da média. Em particular, no mês julho, a concentração de MLSS esteve 40% acima da média. Nesta altura, a linha de lamas encontrava-se com diversos

problemas operacionais, que limitou o escoamento das lamas do reator biológico em quantidade suficiente, o que implicou a acumulação de sólidos no tanque de arejamento.

Para um sistema de média carga, com arejamento escalonado, poder-se-á compará-lo idealmente a um sistema de média carga *plug flow reator (PFR)* e *complete mix (CSTR)*. O primeiro tipo de reator é caracterizado por apresentar valores máximos da razão A/M e CBO no ponto de alimentação e mínimos à saída, enquanto que o segundo tipo não apresenta variação significativa ao longo do reator.

Para um sistema do tipo *PFR* a gama recomendada de MLSS é entre 1000 a 3000  $mg.L^{-1}$  e num sistema do tipo *CSTR*, a gama recomendada é entre 1500 a 4000  $mg.L^{-1}$ . Na ETAR de Ílhavo, a concentração de sólidos dentro do reator é consideravelmente elevada, na ordem dos 79 % e 34 % em relação ao limite máximo do reator tipo *PFR* e reator tipo *CSTR*, respetivamente.

No entanto, aparentemente não se verifica um impacte direto na operação do sistema de lamas de ativadas, visto que as cargas estão dentro das gamas recomendadas e além disso, o tratamento efluente cumpre maioritariamente os VLE impostos legalmente.

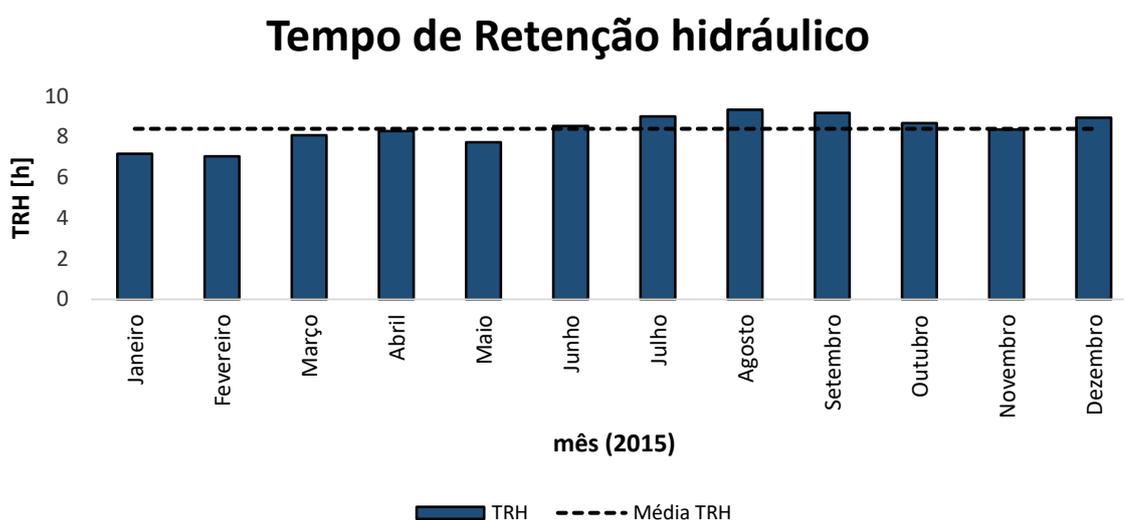


**Figura 27 – Concentração de sólidos suspensos totais e voláteis no reator biológico durante o ano 2015**

#### 5.1.2.5 TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO

A análise do tempo de retenção hidráulico permite estimar o tempo médio que a água residual permanece dentro do tanque biológico. Utilizando a equação (9) obteve-se os resultados que se encontram na Figura 28.

Globalmente verificou-se que durante 2015, o TRH foi de 8,4 horas ou seja, em média, a água residual permanece 8,4 horas dentro do tanque biológico. agosto foi o mês que registou maior TRH, permanecendo a água residual mais 10% do tempo médio. O valor obtido, encontra-se no limiar superior recomendado o reator PFR e bastante superior no caso do reator CSTR.



**Figura 28 - Tempo de retenção de hidráulico o ano de 2015**

#### 5.1.2.6 TEMPO DE RETENÇÃO DE SÓLIDOS (TRS)

A idade das lamas ou tempo de retenção de sólidos (TRS) traduz o tempo médio que uma partícula permanece no sistema e foi calculada utilizando a equação (8).

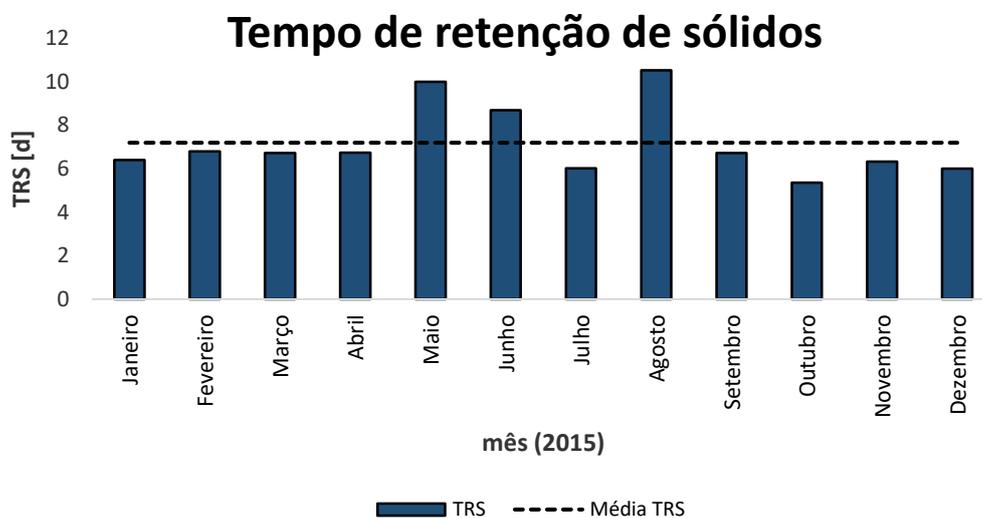
Como se pode verificar na Figura 29 constata-se que, durante 2015, o valor médio foi de 7,2 dias e portanto, encontra-se dentro da gama recomendada.

Maio e agosto foram os meses em que registaram valores mais altos, 28 e 31 % a mais respetivamente, em relação à média anual.

Parte dos microrganismos, também designados por biomassa, produzidos são retirados do sistema, correspondendo às lamas em excesso. A purga de lamas é o principal ponto de controlo do tempo médio de residência da biomassa no sistema biológico. Ou seja, em função do TRS pretendido é retirado determinado volume de lamas, tal como se pode observar na Tabela 11.

. Nos meses de maio e agosto foram aqueles onde se registou a menor retirada de lamas em excesso, devido a várias limitações no escoamento das lamas secundárias,

nomeadamente ao nível de tratamento da linha de lamas, e que consequentemente fizeram aumentar o TRS.



**Figura 29 – Idade das lamas no tanque de arejamento, durante o ano de 2015**

**Tabela 11 – Volumes de lamas em excesso**

Mês	Volume de Lamas Excesso [m <sup>3</sup> /d]
Janeiro	395,3
Fevereiro	336,0
Março	466,6
Abril	431,8
Mai	263,4
Junho	325,5
Julho	536,8
Agosto	275,8
Setembro	485,7
Outubro	542,3
Novembro	485,0
Dezembro	534,1
<b>Média</b>	<b>423,2</b>

#### 5.1.2.7 OXIGÉNIO DISSOLVIDO

O oxigénio necessário ao tratamento é função das necessidades dos microrganismos para degradar a matéria orgânica presente na água residual. O oxigénio dissolvido é medido através de duas sondas de oxigénio localizadas a meio e no final de cada tanque. As sondas permitem detetar instantaneamente as variações do oxigénio, permitindo um funcionamento mais eficiente das turbinas. Em função das características do efluente, os microrganismos

necessitam de diferentes quantidades de OD para metabolizar a matéria orgânica, e portanto, a monitorização em contínuo permite avaliar e adequar o fornecimento de oxigénio, evitando por um lado o seu fornecimento em excesso, ao qual está associado gastos energéticos, e por outro lado, o fornecimento em défice, para que se garanta o mínimo para o tratamento.

Embora o *Metcalf & Eddy* (2014) recomende a concentração de oxigénio entre 1 e 2 ppm, na ETAR de Ílhavo basta, em média, 0,7 ppm para assegurar o tratamento e o cumprimento dos VLE estabelecidos na licença de descarga de águas residuais. Deste modo, a utilização de níveis mais baixos de oxigénio dissolvido requerem uma menor utilização das capacidades das turbinas, o que conseqüentemente implica uma redução de custos.

Procedeu-se também à análise da variação do oxigénio dissolvido paralelamente com o tempo de funcionamento das turbinas para cada uma das secções dos tanques de arejamento. Esta conjugação teve por objetivo identificar padrões, causas e efeitos baseados no funcionamento do sistema de arejamento, no último ano. As suas representações gráficas estão na Figura 31, Figura 32, Figura 34 e Figura 35 para a secção A1, A2, B1 e B2, respetivamente. É apresentado ainda na Figura 30 e Figura 33 as concentrações de OD para cada tanque, juntamente com a variação da temperatura.

O fornecimento de oxigénio à água residual é conseguido através de turbinas que funcionam de acordo com um determinado algoritmo, com set-points e tempos ajustáveis. Por este motivo, importa primeiro referir que para cada um dos meses em análise poderá estar associado um conjunto de definições que condicionam o oxigénio dissolvido. Em segundo lugar, em cada um dos gráficos encontra-se a temperatura média. A temperatura é igualmente um fator com elevada importância na variação do oxigénio dissolvido, visto que o seu aumento dificulta a difusão do oxigénio na água residual.

## **TANQUE A**

É importante referir que no mês de janeiro, novembro e dezembro a turbina 1 esteve sem funcionamento 27, 28 e 24 dias, respetivamente. Também nos últimos 15 dias do ano e alguns dias não consecutivos em novembro a turbina 2 esteve parada. O facto de a turbina não ter estado em funcionamento deveu-se a problemas operacionais e avarias no equipamento. Os meses onde se registam estas ocorrências são maioritariamente no Inverno, estando associado a temperaturas mais baixas e maior pluviosidade. Estas duas

---

características combinadas implicam por um lado menor necessidade de fornecer oxigénio ao efluente, visto que este chega à ETAR mais diluído, e por outro lado uma maior facilidade de transferir oxigénio, dadas as temperaturas mais baixas.

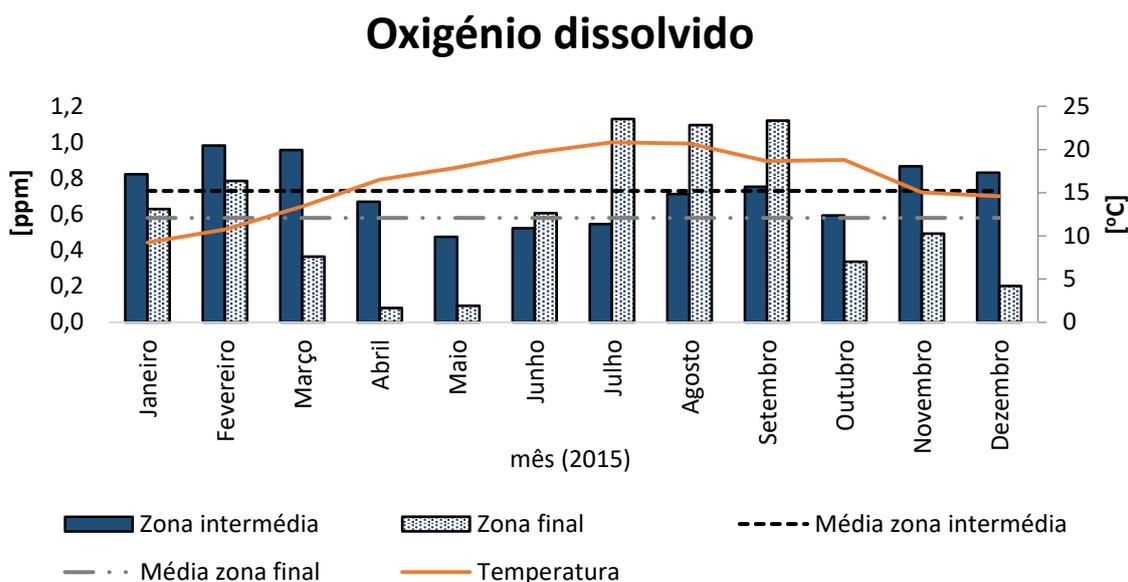
Uma turbina quando não está em funcionamento, em particular, a que possui a maior potência (55 kW) representa um grande impacto no arejamento do sistema. De forma a estimar a influência de uma turbina no fornecimento de oxigénio no reator tem-se:

$$\frac{(55 + 37 + 30 + 30)kW}{\text{reator}} \times 2 \text{ reatores} = 304 \text{ kW}$$

Isto significa que o sistema de arejamento é composto por 4 turbinas em cada tanque apresentado uma potência total de 304 kW. A avaria da primeira turbina (55kW) implica uma redução de 18 % da potência total disponível para arejamento e agitação. É necessário ter ainda em consideração que esta turbina, para além ser a que tem mais potência é também a que têm maior importância no arejamento, dado estar à entrada do reator, onde se localiza a maior carga orgânica.

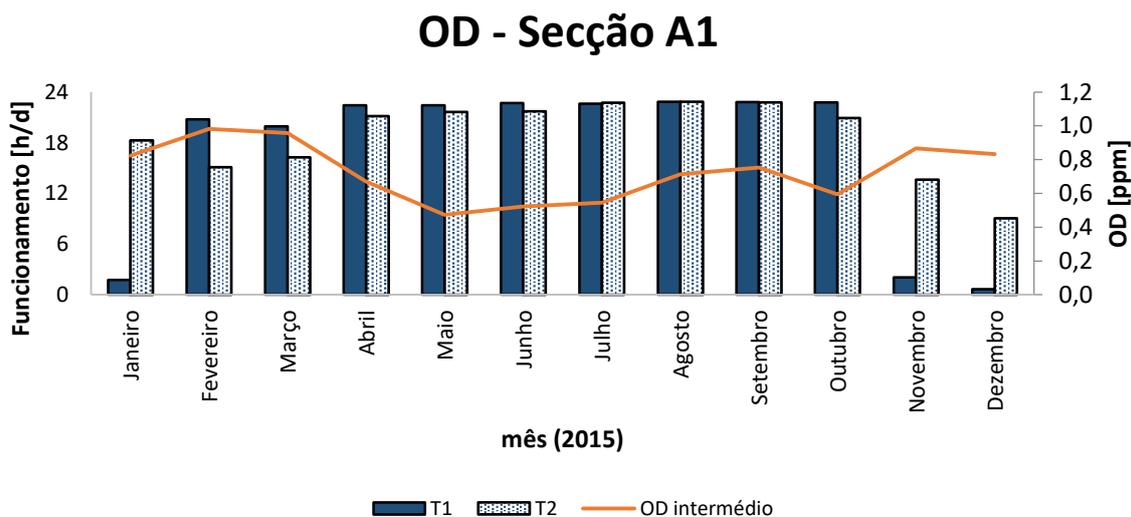
Ao longo do ano 2015 verificaram-se vários picos de OD. Por um lado, o excesso de oxigénio, embora se assuma como um gasto energético desnecessário, garante pelo menos que os microrganismos têm o necessário para o seu metabolismo. Por outro lado, o défice de oxigénio pode estar associado à oxidação incompleta da matéria orgânica. Em particular, o oxigénio na zona final do tanque, entre abril e maio, atingiram mínimos de 0,08 e 0,09 ppm respetivamente, o que de acordo com a Figura 32, advêm do facto de a turbina não ter estado operacional.

Em média, o tanque A teve uma concentração de OD de 0,73 ppm na zona intermédia. Já à saída do tanque teve uma concentração de OD 0,58 ppm, verificando-se uma redução de 20 % ao longo do tanque (Figura 30).



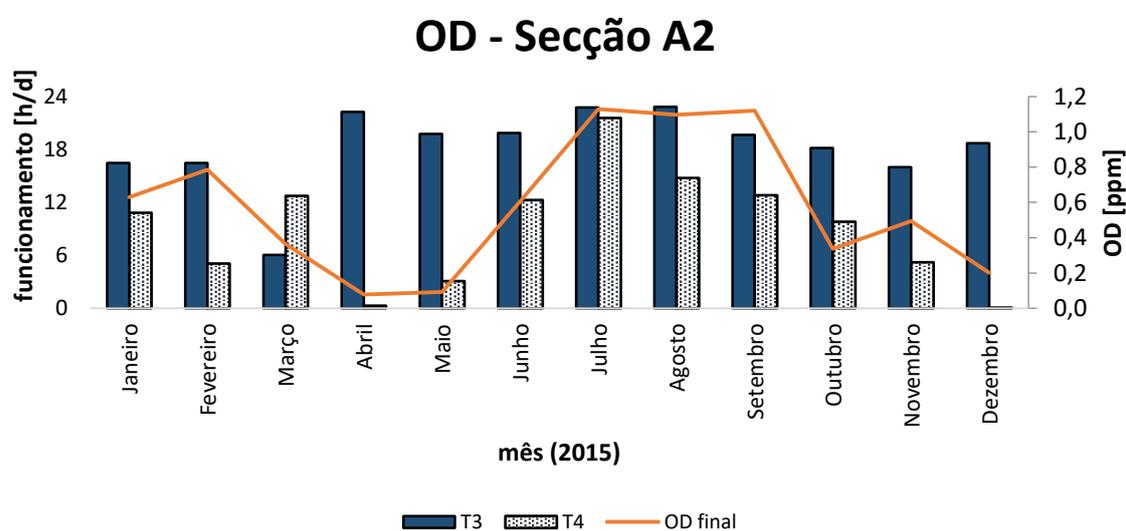
**Figura 30 – Concentração de oxigénio dissolvido no tanque A**

Para a secção A1 (Figura 31) observou-se que, no período de abril a outubro as turbinas 1 e 2 funcionaram pelo menos 21 horas do dia, sendo também nestes meses onde o oxigénio se encontrava mais baixo. Por outro lado, apesar das turbinas estarem a funcionar quase em contínuo em maio, junho e julho, a média do oxigénio dissolvido situou-se em valores baixos, aproximadamente de 0,5 ppm. Tal como referido anteriormente, a temperatura tem um papel crucial na transferência de oxigénio, sendo que o seu aumento irá dificultar a transferência do oxigénio para o efluente.



**Figura 31 – Tempo de funcionamento das turbinas e OD da secção A1 do tanque biológico**

A secção A2 (Figura 32) recebe os efluentes que advêm da secção A1, pelo que é preciso considerar que a análise tanto do tempo de funcionamento das turbinas como do oxigénio dissolvido é influenciado por este facto. Nos meses de Verão as turbinas da secção A2 funcionam durante mais horas para poder garantir o oxigénio necessário para os microrganismos desempenharem as suas funções. Já no Inverno como não é necessário tanto oxigénio, parte das vezes optou-se por desligar as turbinas 3 e 4. Para além de imediatamente estar associado a uma poupança económica, este procedimento está relacionado com uma técnica denominada por “*aeration tank settling*”. Através desta abordagem pretende-se manter ou aumentar a eficiência de tratamento durante o período de chuva, permitindo que os sólidos sedimentem no fim do tanque biológico, impedido o excesso destes na saída do decantador secundário.

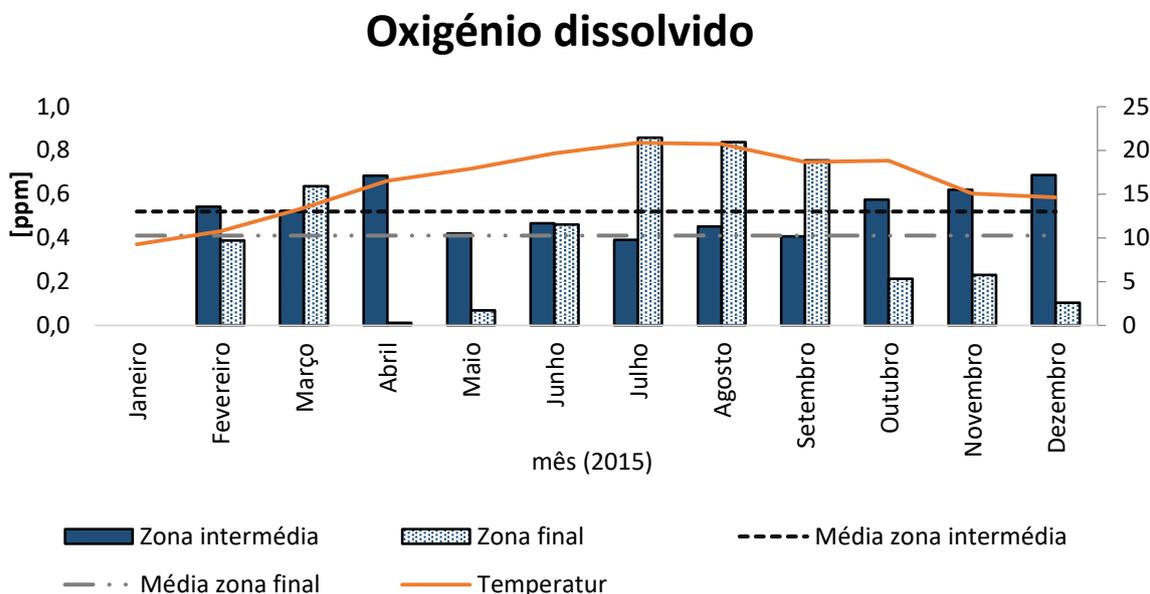


**Figura 32 – Tempo de funcionamento das turbinas e OD da secção A2 do tanque biológico**

### **TANQUE B**

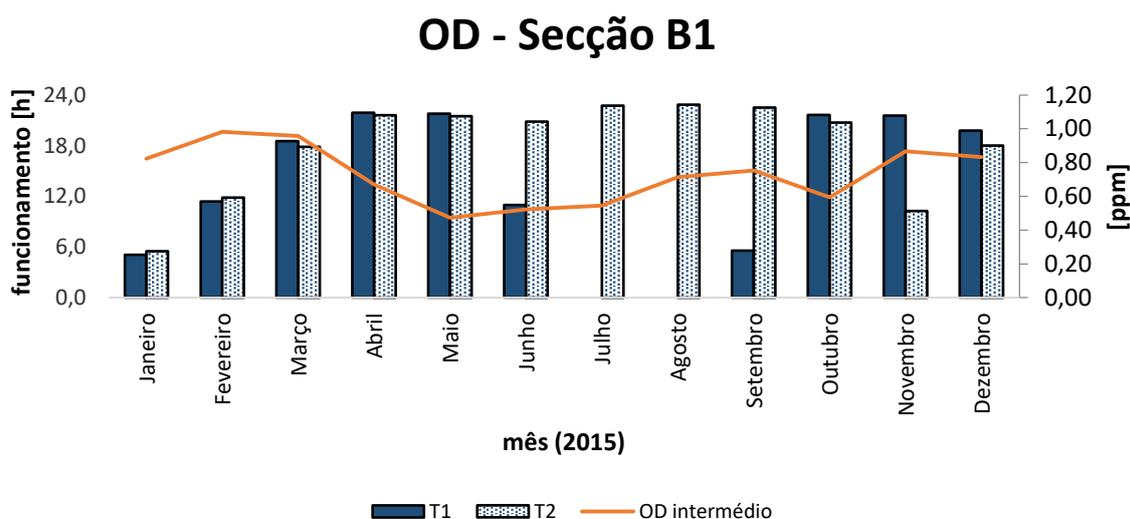
Ao longo do ano de 2015 verificaram-se vários picos de OD. Primeiramente, de janeiro a meados de fevereiro o tanque B esteve desativado. A turbina 3 apenas começou a operar em Abril. Depois, houveram problemas técnicos, nomeadamente ao nível da turbina 1, ficando inoperacional durante os meses de julho e agosto, que são os meses onde se registou menor concentração de OD na zona intermédia. Nesta zona, ao longo do ano de 2015, a média foi de 0,52 pmm, e na zona final 0,41 ppm, registando-se uma diminuição dos níveis de oxigénio ao longo do tanque de 17 % (Figura 33).

Em particular, o oxigénio na zona final do tanque, entre abril e maio, atingiram mínimos de 0,01 e 0,07 ppm respetivamente, que de acordo com a Figura 35, advêm do facto de a turbina 4 não ter estado operacional.

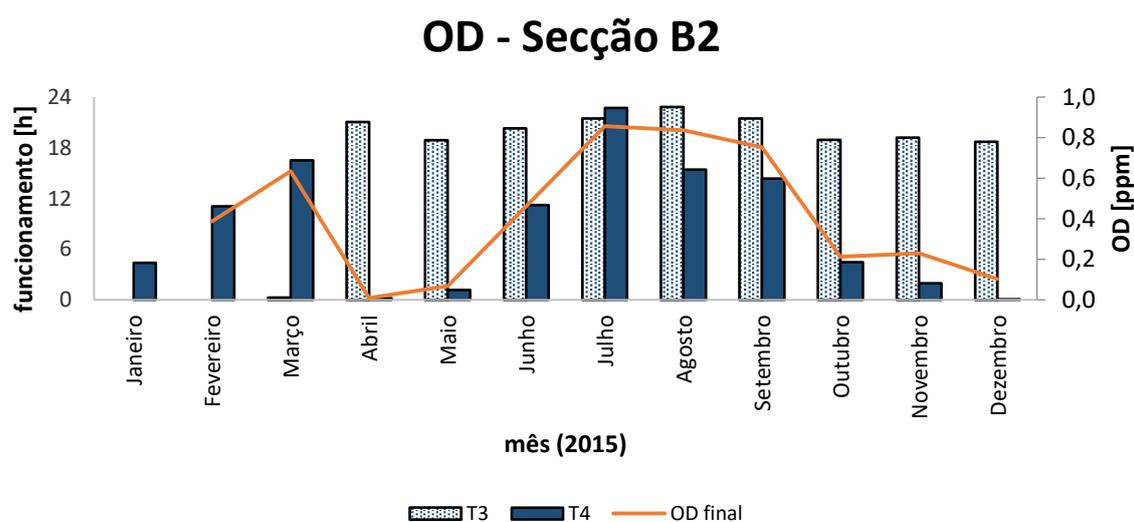


**Figura 33 - Concentração de oxigénio dissolvido no tanque B**

Tal como no caso da secção A1 verificou-se a descida na secção B1 do nível médio de oxigénio entre abril e outubro, provavelmente pelos mesmos motivos que já foram enunciados. De igual forma o fornecimento de oxigénio na secção B2 foi aumentado de modo a suprir as necessidades de oxigénio para tratar o efluente.



**Figura 34 – Tempo funcionamento das turbinas e OD da secção B1 do tanque biológico B**

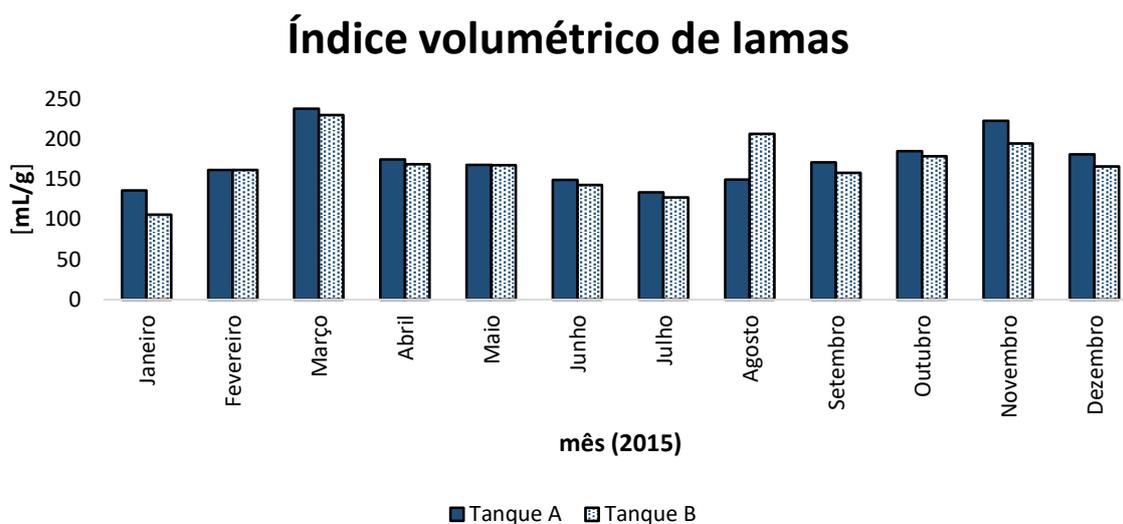


**Figura 35 – Tempo funcionamento das turbinas e OD da secção B1 do tanque biológico**

#### 5.1.2.8 ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LAMAS

O índice volumétrico de lamas é um parâmetro de grande importância no controlo diário do processo de lamas ativadas na ETAR. Além de ser um importante indicador do funcionamento dos decantadores secundários e espessadores, o IVL fornece informação como tonalidade e espessura das lamas, quantidade de sobrenadante, etc.

Durante o ano de 2015, o IVL oscilou entre 100 e 250 mL/g (Figura 36). De acordo com o *Metcalf & Eddy*, valores acima do 150 mL/g são indicativos de fraca sedimentabilidade.



**Figura 36 – Índice volumétrico de lamas durante o ano 2015**

### 5.1.3 CUMPRIMENTO DOS REQUISITOS LEGAIS

A ETAR de Ílhavo possui uma licença para a utilização dos recursos hídricos nomeadamente para a rejeição de águas residuais. Apesar de ter a obrigação de cumprir vários parâmetros, nesta apenas seção se irá focar em três desses parâmetros: sólidos suspensos totais (SST), carência química de oxigénio (CQO) e carência bioquímica de oxigénio (CBO). Para estes parâmetros os limites estabelecidos são  $60 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $125 \text{ mg O}_2.\text{L}^{-1}$ , e  $25 \text{ mg O}_2.\text{L}^{-1}$ , respetivamente

Tal como se pode verificar na Figura 37, Figura 38 e Figura 39, de uma forma geral, verifica-se que em janeiro, julho e dezembro ocorreram excedências no cumprimento dos VLE para os parâmetros CQO, CBO e SST. À exceção destes meses, no global a ETAR cumpriu os parâmetros de descarga para às águas residuais.

No que diz respeito aos sólidos suspensos totais, verificaram-se excedências em janeiro, julho e novembro, tendo sido julho o mais preocupante. No mês de janeiro, tratou-se apenas de uma amostragem isolada e rapidamente o tratamento voltou a cumprir os limites para este parâmetro. Em julho, tal como já apresentado na Figura 27, foram detetados no tanque de arejamento elevados níveis de concentração de sólidos suspensos, o que acabou por se refletir nos valores de SST à saída da ETAR. Também em novembro se registou um aumento do índice volumétrico de lamas, o que pode ser indicativo da fraca sedimentabilidade dos sólidos, e que pode ter condicionado a separação líquido-sólido no decantador secundário. Para além disso, e pontualmente, durante o ano de 2015,

verificaram-se vários problemas operacionais a linha de tratamento de lamas (nomeadamente na unidade de desidratação de lamas secundárias), o que levou a limitações escoamento das lamas, permitindo a sua acumulação tanto no reator biológico, como no decantador secundário.

Analisando a variação dos parâmetros de CQO e CBO<sub>5</sub> é possível observar que as excedências acontecem no mesmo período de tempo que para os SST, tal como já foi referido.

### Sólidos suspensos totais

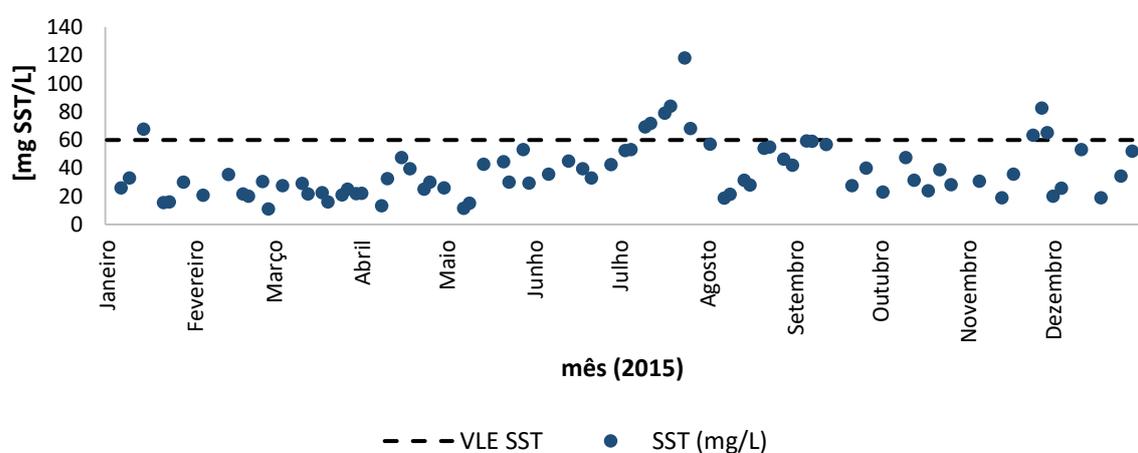


Figura 37 – Sólidos suspensos totais à saída da ETAR, durante o ano 2015

### Carência Química de Oxigénio

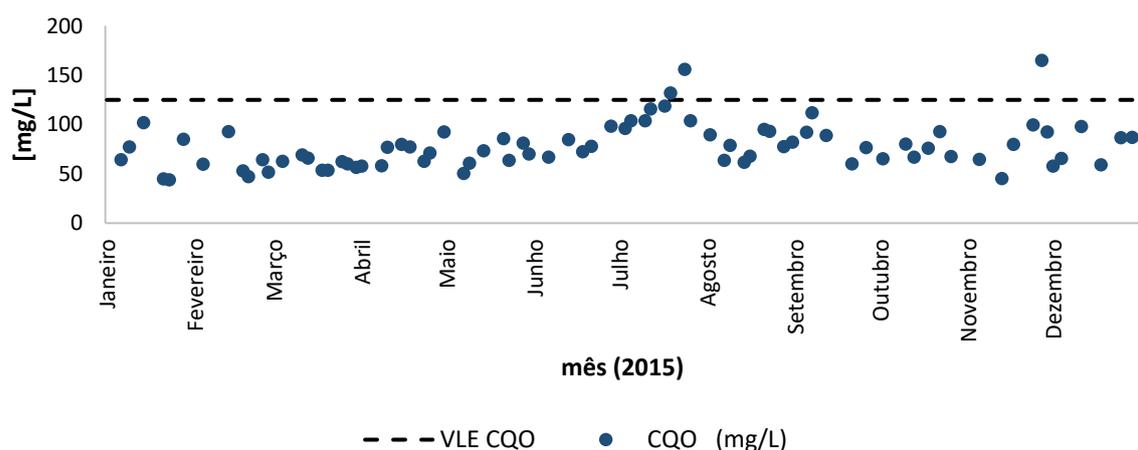
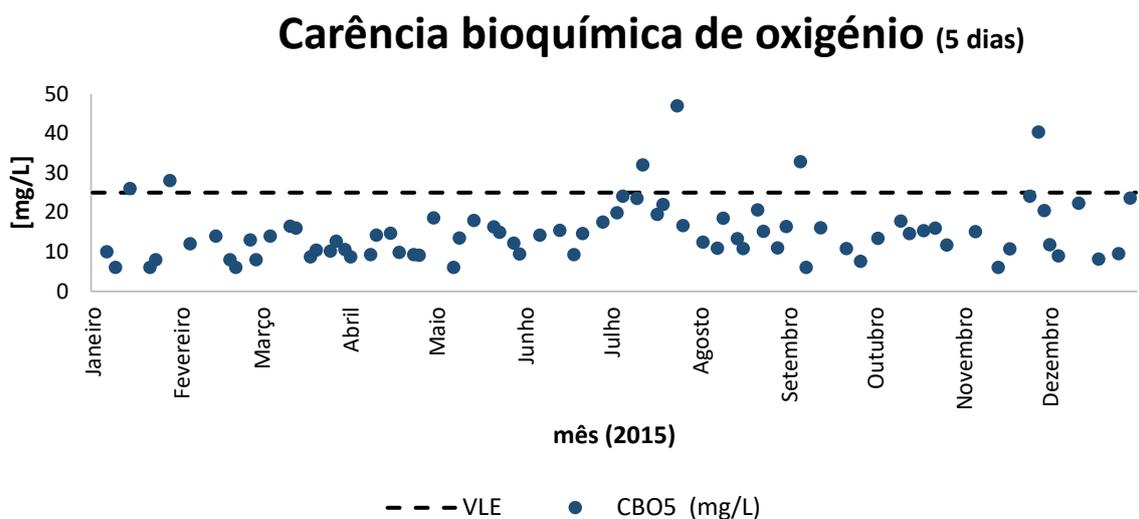


Figura 38 - Carência química de oxigénio à saída da ETAR, durante o ano 2015



**Figura 39 - Carência bioquímica de oxigênio à saída da ETAR, durante o ano 2015**

Tal como já referido, em janeiro, julho e dezembro ocorreram excedências nos parâmetros CQO, SST e CBO. As análises do tempo de funcionamento e níveis de oxigênio dissolvido revelam que as excedências coincidiram com:

- Em janeiro, a turbina 1 do tanque A esteve avariada e o tanque B não operou em contínuo;
- Em julho, a turbina 1 do tanque B esteve avariada representando cerca de quase 20 % da capacidade total de arejamento da ETAR. Para agravar a situação, esta avaria aconteceu num período de temperaturas elevadas o que dificultou ainda mais a transferência de oxigênio;
- Em dezembro, as turbinas 1 e a 4 do tanque A estiveram praticamente sem operar, bem como a turbina 4 do tanque B.

Há portanto, um conjunto de acontecimentos, nomeadamente avaria nas turbinas, problemas operacionais com a linha de lamas e na retirada de lamas em excesso, para além das características do efluente e das condições ambientais, tais como a temperatura e a precipitação, que levaram a que haja um ineficiente tratamento da água residual em alturas específicas, o que levou a valores excedentários aos valores limites estabelecidos pela licença especial para a descarga em meio hídrico.

---

## 5.2 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AREJAMENTO DAS LAMAS ATIVADAS

### 5.2.1 ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AREJAMENTO

Na Figura 16 e Figura 17 do ponto 4.2.1 pode observar-se o aspeto geral do programa de gestão da ETAR onde os parâmetros; nível de OD mínimo e máximo; set-point de OD; e tempos de paragem e arranque podem ser ajustados.

Como as necessidades de oxigénio decrescem ao longo do tanque de arejamento, a programação e gestão do programa de controlo é feita separadamente para cada turbina, de forma a permitir uma maior facilidade na utilização e variação de diferentes tempos de paragem e arranque associado ao seu funcionamento bem como diferentes *set-points* para o nível de oxigénio dissolvido. Este facto promove um maior controlo em relação ao sistema de arejamento, permitindo sempre que necessário, o ajuste das principais variáveis.

Para uma análise mais rigorosa do funcionamento do sistema de arejamento foi necessário conhecer primeiro o modo de funcionamento do algoritmo que já estava implementado. Este procedimento incluiu a análise da sua integridade, dado haver a desconfiança de que, o funcionamento das turbinas pudesse ter sido alterado, uma vez que a direção da ETAR e os próprios operadores sofreram alterações ao longo dos anos de operação. É de referir que não havia o conhecimento de quaisquer alterações.

#### 5.2.1.1 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Na Figura 40 está representado o diagrama de funcionamento das turbinas de arejamento com base nas instruções fornecidas pela PRIDESA (Anexo A).

$T1$  e  $T2$  significam turbina 1 e 2 respetivamente, enquanto que  $t1, t2, t3$  e  $t4$  são os tempos ajustáveis no sinóptico. SP1 corresponde ao set-point mínimo de OD, ou seja, à concentração mínima de oxigénio dissolvido e SP2 corresponde ao set-point máximo de OD, ou seja, à concentração máxima de oxigénio dissolvido.

É de notar que embora o algoritmo diga respeito a  $T1$  e  $T2$ , este também é aplicável de igual forma quer para  $T3$  e  $T4$  (turbina 3 e turbina 4, respetivamente), quer para o segundo tanque de arejamento.

O funcionamento deste algoritmo baseia-se nos seguintes pressupostos:

1. Inicialmente a turbina 1 arranca. Se atingir a concentração de oxigénio dissolvido mínimo no tempo pretendido, avança com o arranque da turbina 2 de modo a

alcançar a concentração máxima de oxigénio. No caso de não se atingir a concentração mínima de  $O_2$  nesse tempo, arranca na mesma a turbina 2 para se atingir primeiro o mínimo e posteriormente o máximo.

É aqui que se verifica a primeira limitação: o algoritmo não prevê a possibilidade de apenas com a turbina 1 se alcançar o  $O_2$  mínimo e o máximo, não sendo assim necessário o arranque da turbina 2 para fornecer oxigénio.

2. Após arrancarem as 2 turbinas, ambas param assim que seja alcançado o  $O_2$  máximo. Caso contrário continuam indefinidamente a funcionar. Após desligarem, arrancam passado o tempo predefinido.

É aqui que se encontra a segunda limitação do algoritmo. O algoritmo não prevê a possibilidade de, em vez de parar as duas turbinas ao mesmo tempo, parar apenas a turbina 2, e só posteriormente parar a turbina 1. Esta alteração permitiria uma maior estabilidade do nível de oxigénio dissolvido, reduzindo assim as oscilações. Para além disso, permitiria a redução de arranques, o que está associada à redução de picos energéticos e a uma poupança mecânica do equipamento. Neste caso, a turbina 1 apenas pararia na situação em que se verificasse que só com ela a funcionar, continuasse a haver um excesso de oxigénio.

Outra limitação relacionada com o algoritmo relaciona-se com o facto de o arranque das turbinas apenas ser função do tempo estabelecido. Uma alternativa poderia ser a conjugação entre o atingir o  $O_2$  máximo e o tempo máximo para arrancar.

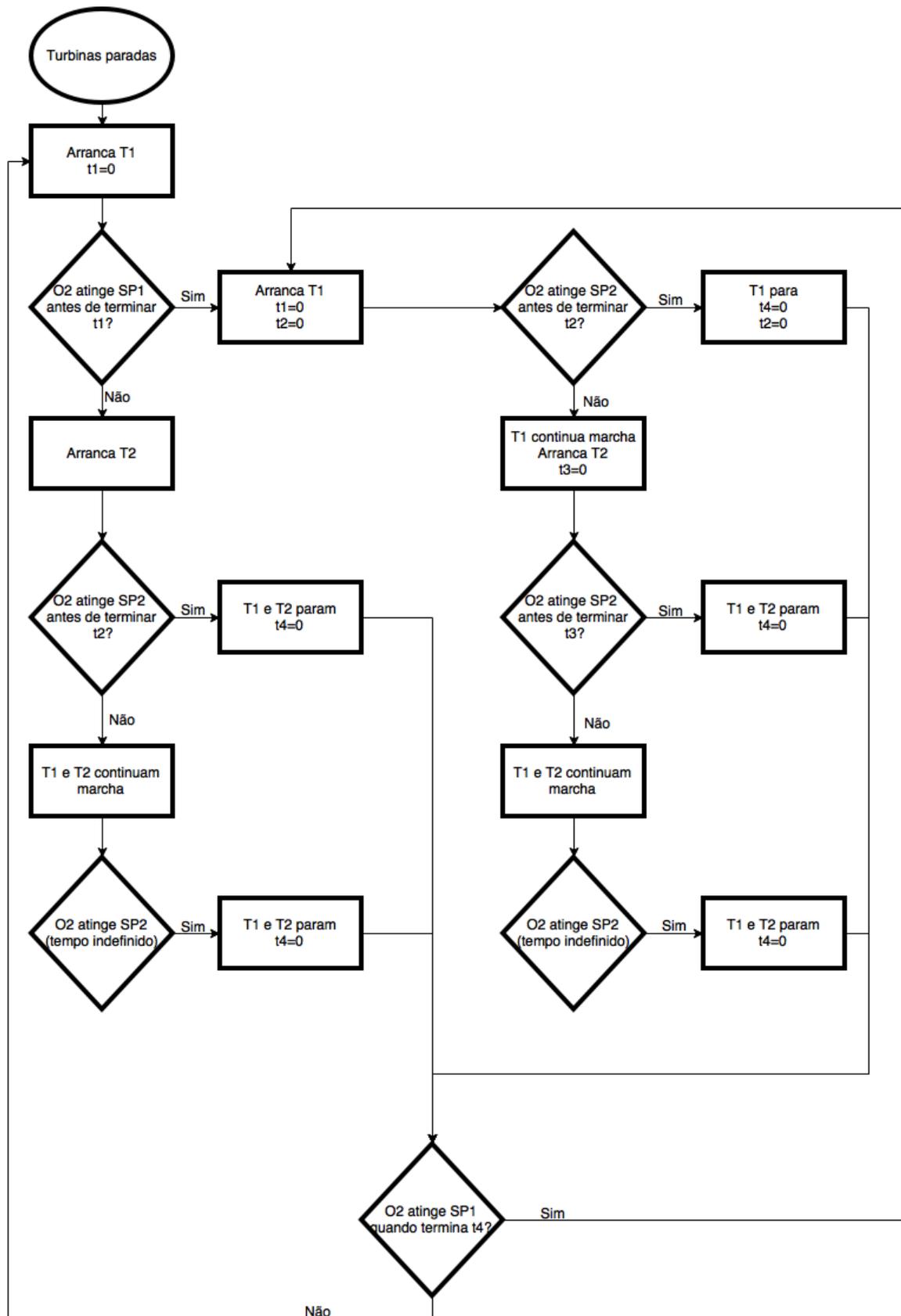


Figura 40 - Diagrama do funcionamento das turbinas do sistema de arejamento

### 5.2.1.2 ANÁLISE DA INTEGRIDADE DO ALGORITMO

Com a finalidade de compreender se o funcionamento das turbinas seguia o algoritmo criado, que teve por base as instruções da empresa PRIDESA realizaram-se alguns ensaios (3 testes) na secção A1 do tanque biológico. Importa referir que nesta análise considera-se a seguinte nomenclatura para o funcionamento das turbinas: 1 - Arranca a turbina 1 ; 2 - Arranca a turbina 2; 3 - Param as duas turbinas;

Em todas as análises o SP1 (set-point mínimo) e o SP2 (set-point máximo) são 0,3 e 0,8 ppm, respetivamente.

→ Teste 1

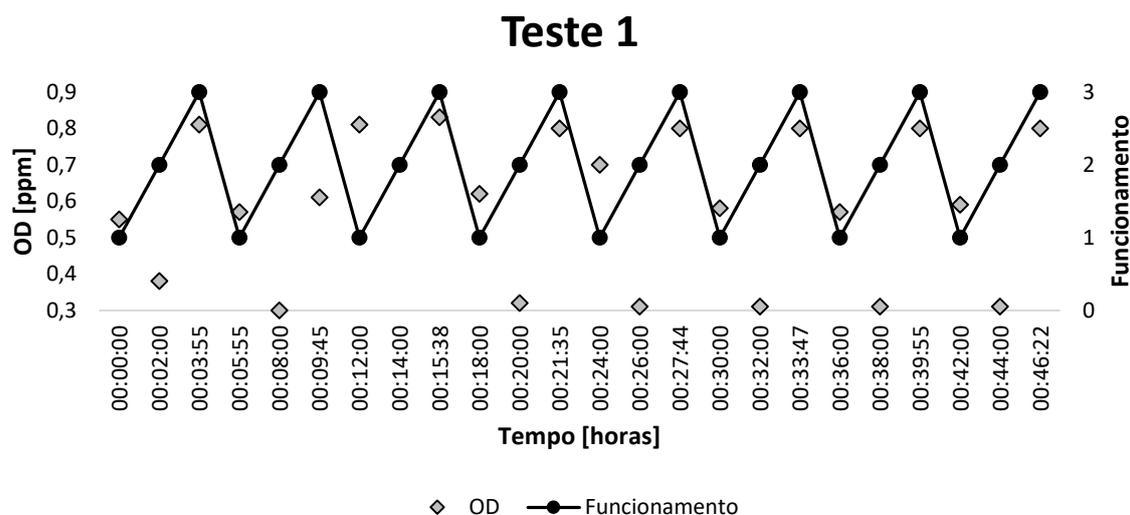
Condições de realização:

Na Tabela 12 encontram-se as condições de operação para o primeiro teste. Posteriormente são ilustrados os resultados (Figura 41).

**Tabela 12 - Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 1**

	<b>Tempo [min]</b>
<b>t1</b>	2
<b>t2</b>	2
<b>t3</b>	3
<b>t4</b>	3

Resultados obtidos:



**Figura 41 – Resultados do teste 1**

Após a análise dos resultados do primeiro teste efetuado ao estudo do funcionamento das turbinas segundo o algoritmo criado pela PRIDESA foi possível identificar os seguintes padrões:

- A turbina 1 arranca sempre passado 6 minutos, tal como a turbina 2;
- A turbina 2 inicia o seu funcionamento 2 minutos após o início de operação da turbina 1;
- Param as duas turbinas ao mesmo tempo assim que atingem o OD máximo.

Com este primeiro teste, apurou-se que o funcionamento das turbinas não seguia as instruções da PRIDESA.

Em primeiro lugar, porque as turbinas desligam-se assim que atingem o SP máximo e não ao fim do tempo  $t_4$ . Depois no que diz respeito aos ciclos de funcionamento, não é direta a relação entre o funcionamento das turbinas e a razão do tempo ser de 6 minutos. O facto de se ter verificado a existência de ciclos repetitivos (início do funcionamento da turbina 1 e 2) independentes da concentração de oxigénio dissolvido pode ser explicado pelo facto da água residual está completamente misturada e a análise ter sido realizada num período de tempo relativamente curto. Neste caso, pode considerar-se que as características do efluente a tratar são constantes, e portanto a utilização do oxigénio pelos microrganismos também o é.

→ Teste 2

Para tentar compreender melhor os ciclos de funcionamento, isto é, a influência que os tempos têm nos ciclos anteriormente detetados, optou-se por aumentar o tempo  $t_2$ , mantendo os restantes tempos iguais ao primeiro teste (Tabela 13).

Condições de realização:

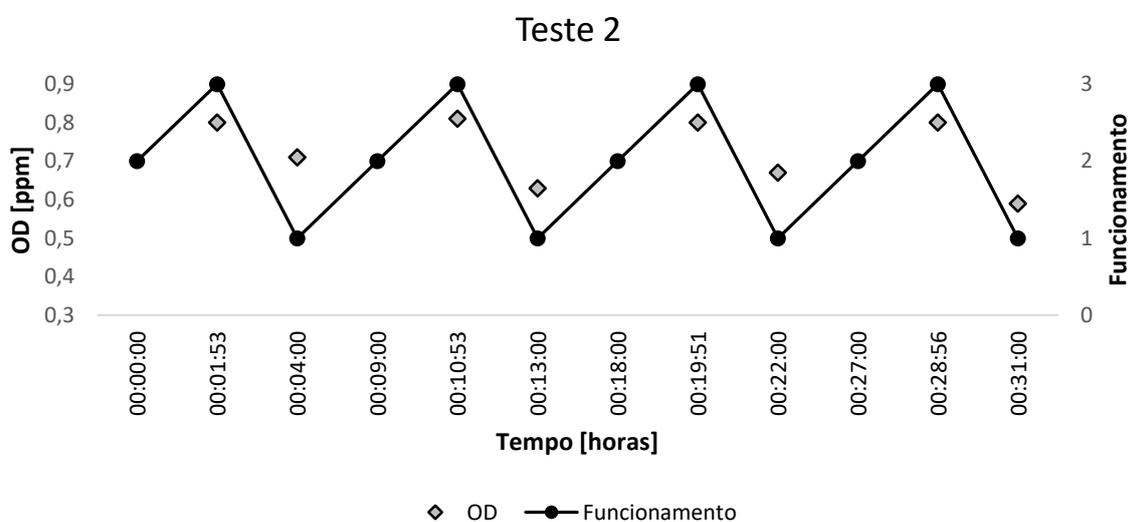
Na Tabela 13 encontram-se as condições de operação para o segundo teste.

**Tabela 13 – Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 2**

	Tempo [min]
<b>t1</b>	2
<b>t2</b>	5
<b>t3</b>	3
<b>t4</b>	3

Resultados obtidos:

A Figura 42 ilustra o segundo teste efetuado.



**Figura 42 – Resultados do teste 2**

Após a análise do segundo teste efetuado ao estudo do funcionamento das turbinas segundo o algoritmo criado pela PRIDESA foi possível identificar os seguintes padrões:

- A turbina 1 arranca sempre passados 9 minutos, tal como a turbina 2;
- A turbina 2 inicia o seu funcionamento 5 minutos após o início de operação da turbina 1;

- Param as duas turbinas ao mesmo tempo assim que atingem o OD máximo;

Com este segundo teste, o tempo de espera entre o arranque da turbina 2 após a turbina 1 estar em funcionamento, foi de 5 minutos. Tal como no teste anterior não se esclareceu a duração dos ciclos de funcionamento da turbina 1.

Posteriormente, efetuou-se a troca do  $t_1$  com  $t_2$ , ou seja  $t_1 = 5$  e  $t_2 = 2$ , tendo-se obtido o mesmo ciclo de funcionamento, cerca de 9 minutos.

→ Teste 3

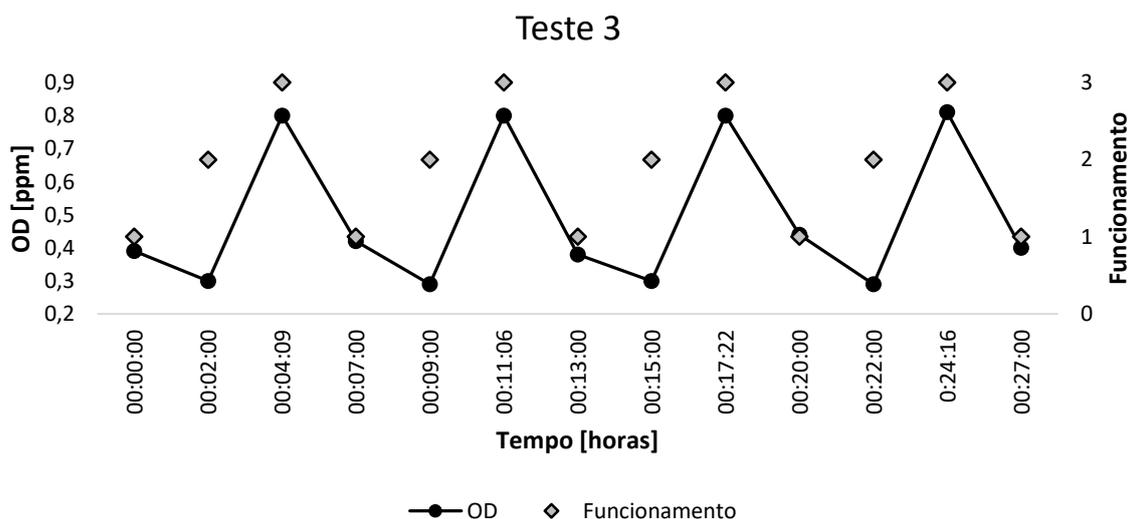
Na Tabela 14 encontram-se as condições de operação para o terceiro teste. Posteriormente são ilustrados os resultados na Figura 43.

Condições de realização:

**Tabela 14 - Condições de operação (tempos) do algoritmo no teste 3**

Tempo [min]	
<b>t1</b>	1
<b>t2</b>	2
<b>t3</b>	3
<b>t4</b>	3

Resultados obtidos:



**Figura 43 – Resultados do teste 3**

Após a análise dos resultados verificou-se que:

- Neste teste não se verifica um padrão no arranque da turbina 1, como nos outros testes tendo arrancado em quer 7 minutos, quer também em 6 minutos;
- A turbina 2 inicia o seu funcionamento 2 minutos após o início de operação da turbina 1;
- Param as duas turbinas ao mesmo tempo assim que atingem o OD máximo;

Foram realizados mais alguns testes operacionais, tendo sido possível concluir, tal como já havia a suspeita, que o modo de funcionamento desenvolvido inicialmente pela empresa PRIDESA já não estava a ser executado. Neste sentido, e dadas também as limitações já referidas, foi decidido avançar para a elaboração de um novo algoritmo com um novo esquema para o funcionamento do sistema de arejamento.

## 5.2.2 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO ALGORITMO

### 5.2.2.1 CRIAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO ALGORITMO

Após os problemas detetados no algoritmo anterior, foram desenvolvidos 2 algoritmos distintos e adaptados ao facto de os motores das turbinas possuírem ou não variador de frequência. Tal como já referido, o funcionamento destes algoritmos assume agora novos pressupostos, na tentativa de melhorar o desempenho do sistema de arejamento, permitindo que possam estar mais adaptados ao efluente e às suas necessidades em oxigénio dissolvido.

Neste contexto, é em seguida apresentado o modo de funcionamento dos dois algoritmos desenvolvidos.

#### **Nomenclatura:**

$t$  – Tempo;

$t_1$  – Tempo máximo de paragem do arejamento;

$t_2$  – Tempo para arranque da turbina 2;

$t_3$  – Tempo de paragem da turbina 2;

$T1$  – Turbina 1;

$T2$  – Turbina 2;

$O_2$  – Oxigénio;

---

$O_2min$  – Oxigénio mínimo;

$O_2máx$  – Oxigénio máximo;

$SP$  – set-point do oxigénio;

#### 5.2.2.2 MODO DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO SEM VARIADOR DE VELOCIDADE

Na Figura 44 está apresentado o algoritmo sem variador de velocidade. O seu funcionamento pode ser explicado através dos seguintes passos:

1. A condição zero assume que ambas as turbinas estão paradas. O tempo começa a contar. Quando é detetada a concentração mínima de oxigénio dissolvido, arranca a turbina 1. Caso contrário, a turbina arranca assim que o tempo ultrapasse  $t_1$ .
2. A turbina 1 está em funcionamento. O tempo volta a zero havendo duas possibilidades:
  - a. A turbina 1 atinge o  $O_2$  mínimo antes de exceder o tempo  $t_2$ . Após um certo tempo atinge o  $O_2$  máximo, parando a turbina. Quando o tempo ultrapassa  $t_4$  sem que seja atingido o  $O_2$  máximo, arranca a turbina 2.
  - b. A turbina 1 não atinge o  $O_2$  mínimo antes que o tempo ultrapasse  $t_2$ . Nesse caso é dada a ordem de arranque da turbina 2.
3. As duas turbinas ficam em funcionamento até que seja atingido o  $O_2$  máximo. Quando o  $O_2$  máximo é atingido, apenas a turbina 2 pára. O tempo volta ao zero. Assim que o tempo ultrapassa  $t_3$ , o ciclo retoma o tópico 2.

### Algoritmo sem variador

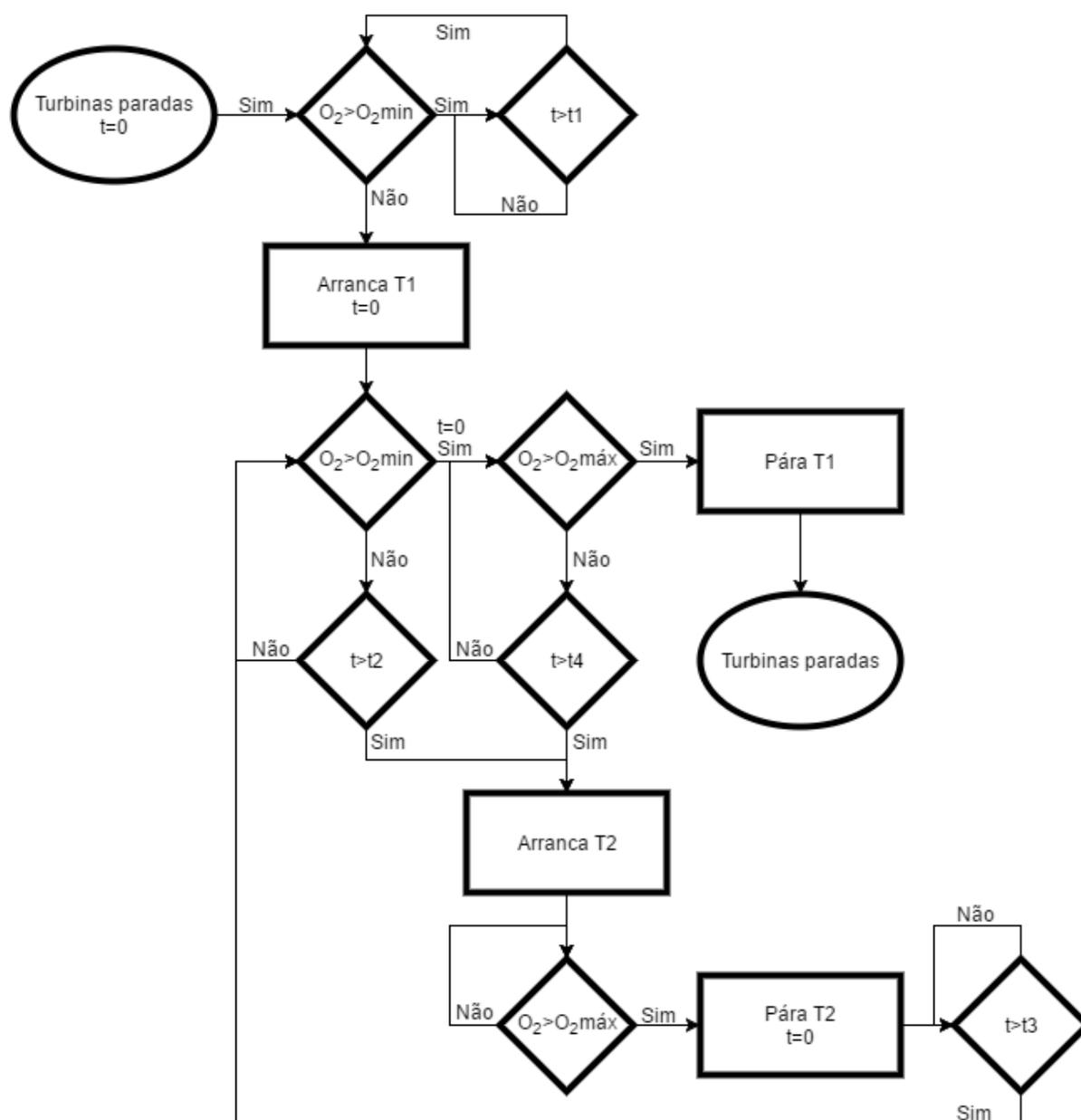


Figura 44 – Algoritmo de funcionamento das turbinas sem variador de velocidade

---

### 5.2.2.3 MODO DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO COM VARIADOR DE VELOCIDADE

Na Figura 45 está apresentado o algoritmo. O seu funcionamento pode ser explicado através dos seguintes passos:

1. A condição zero assume que ambas as turbinas estão paradas. O tempo começa a contar. Quando o oxigénio é menor que o  $O_2$ min, arranca a turbina 1. Caso contrário, arranca assim que o tempo ultrapasse  $t_1$ . O arranque da turbina é feito à frequência mínima do motor, ou seja 23 Hz. O tempo volta ao início.
2. A turbina 1 está em funcionamento:
  - a. O  $O_2$  encontra-se abaixo do set-point estabelecido.
    - i. Enquanto a frequência for inferior a 50 Hz, esta vai incrementando gradualmente, aumentando assim a velocidade de rotação da turbina. Quando chega à frequência máxima de 50 Hz e o tempo é maior que  $t_2$ , então a turbina 2 arranca.
  - b. O  $O_2$  encontra-se acima do set-point estabelecido. A frequência vai diminuindo gradualmente até ao mínimo de 23 Hz. No caso de se ter atingido a frequência mínima, e o  $O_2$  continuar acima do set-point, então:
    - i. Se estiver acima do  $O_2$  máximo, a turbina 1 pára.
    - ii. Se estiver abaixo do  $O_2$  máximo, retoma-se o tópico 2.
3. A turbina 2 arranca à frequência mínima (a turbina 1 está nesse momento à frequência máxima):
  - a. O  $O_2$  encontra-se abaixo do set-point estabelecido.
    - i. Até à frequência de 50 Hz, vai aumentando gradualmente a velocidade de rotação da turbina 2. Quando se atingir 50 Hz, ambas as turbinas estão em funcionamento à velocidade máxima até que o oxigénio seja superior ao set-point estabelecido.
  - b. O  $O_2$  encontra-se acima do set-point estabelecido. A frequência vai diminuindo gradualmente até ao mínimo de 23 Hz. No caso de se atingir a frequência mínima, e o  $O_2$  continuar acima do set-point, então:
    - i. Se estiver acima do  $O_2$  máximo, a turbina 2 pára. O tempo volta ao zero.

- ii. Se estiver abaixo do  $O_2$  máximo, ambas as turbinas permanecem em funcionamento. Retoma-se o tópico 3.
4. A turbina 2 está parada. Assim que o tempo atinge  $t_3$ , então:
- a. Se o  $O_2$  for superior ao máximo, então a turbina 1 pára também.
  - b. Se o  $O_2$  estiver abaixo do máximo, é retomado o tópico 2.

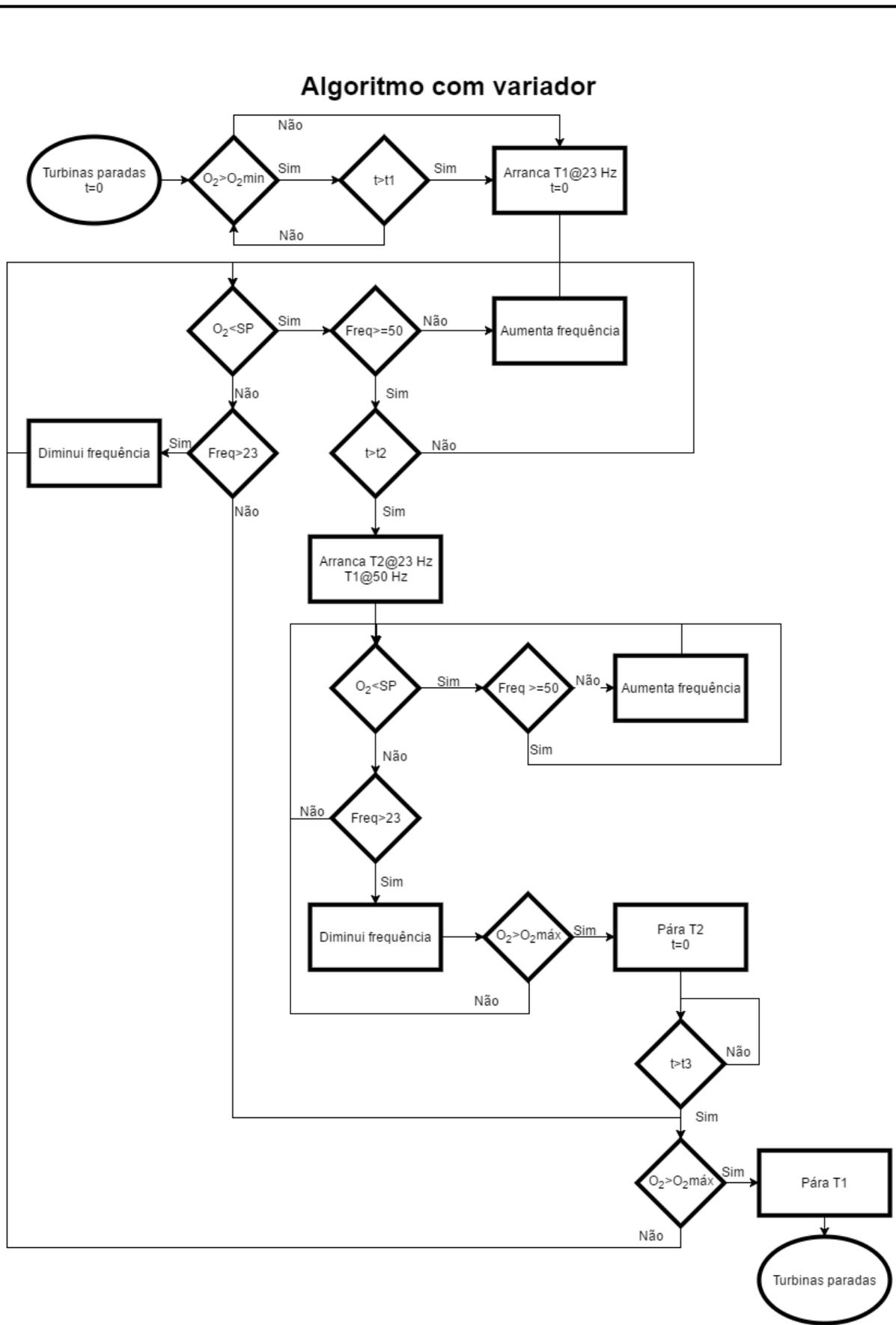


Figura 45 - Algoritmo de funcionamento das turbinas com variador de velocidade

### 5.2.3 *NOTA TÉCNICA SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE AREJAMENTO*

A nota técnica encontra-se no Anexo B.

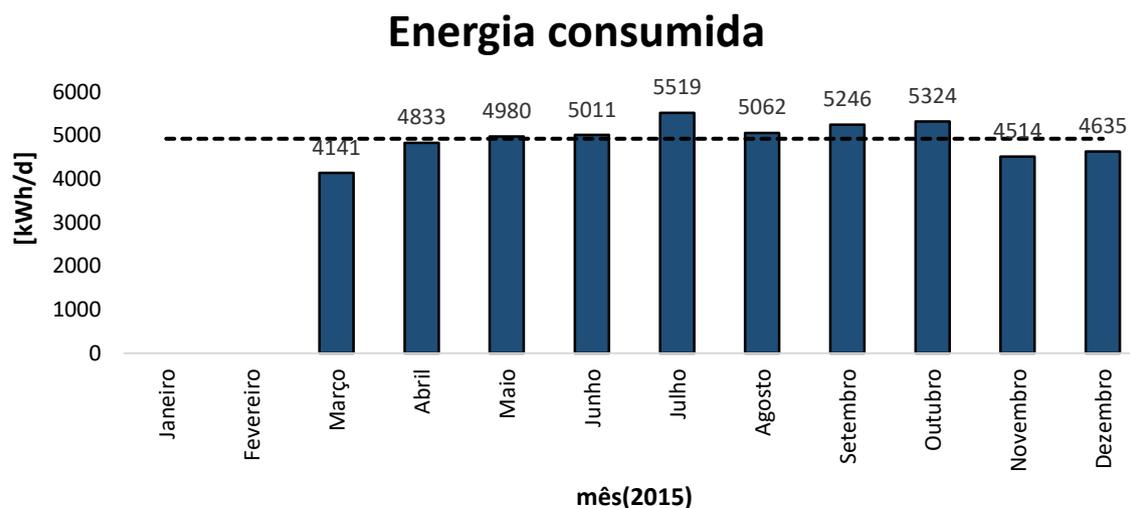
## **5.3 ESTUDO ENERGÉTICO DO SISTEMA DE AREJAMENTO**

### 5.3.1 *ENERGIA CONSUMIDA NO TRATAMENTO SECUNDÁRIO*

A análise dos consumos energéticos associados ao tratamento secundário engloba vários setores. Estes setores englobam a energia despendida nas turbinas, na recirculação de lamas, nas lamas em excesso, nas pontes dos decantadores secundários, nos flutuantes secundários e no poço de drenagem. Na Figura 46 está apresentada a variação da energia consumida durante o ano de 2015 (não existem dados de janeiro e fevereiro).

Anualmente verificou-se que a média foi de 4926 kW.d<sup>-1</sup>. É possível constatar que o mês com maior consumo é o mês de julho, consumindo cerca de mais 12 % em relação à média anual. Por outro lado, março foi aquele mês onde os consumos foram menores, representando uma poupança energética na ordem do 16%, relativamente à média anual.

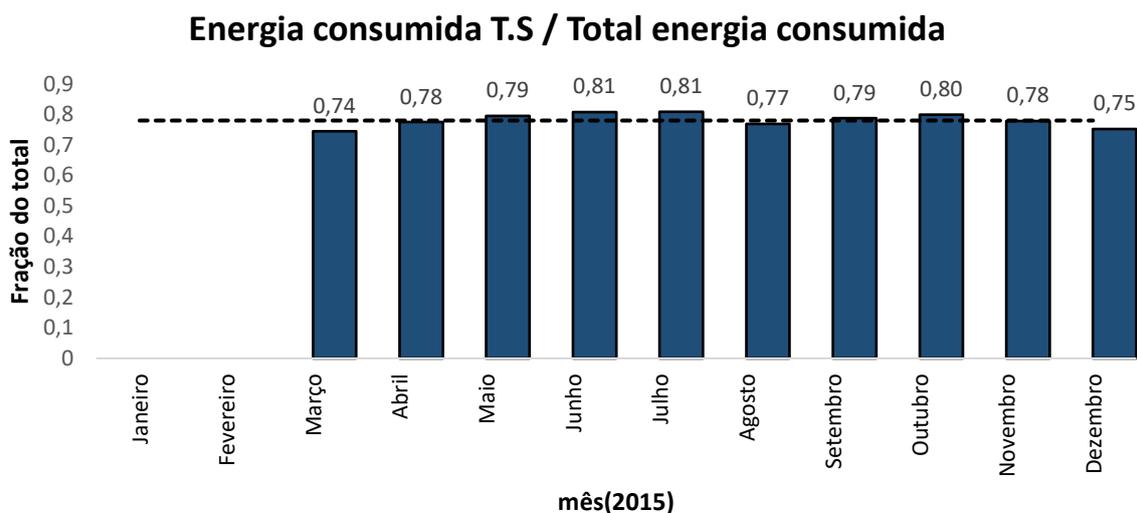
A análise global permite perceber que o período onde houve um maior consumo de energia foi durante o Verão. Uma das explicações para o sucedido está relacionada com o facto de neste período ser necessário haver um reforço do arejamento, dado que o efluente chega à ETAR com uma maior carga e com menor quantidade de oxigénio dissolvido, sendo assim necessário aumentar o fornecimento de O<sub>2</sub> de modo a que os microrganismos tenham as condições necessárias para degradar a matéria orgânica.



**Figura 46 – Energia consumida no tratamento secundário, durante o ano de 2015**

Os indicadores são ferramentas que podem dar outra perspetiva sobre o estado de uma variável em relação a outra. De forma a se compreender melhor quanto é que os consumos energéticos do tratamento secundário representam da energia consumida em toda a ETAR, analisou-se o indicador “ Energia consumida no tratamento secundário (T.S.) / Energia total consumida” (Figura 47).

Durante o ano 2015, este indicador variou entre 0,74 e 0,81, ou seja, a energia associada ao tratamento secundário representa pelo menos 74 %, podendo mesmo ultrapassar os 80 % dos consumos energéticos existentes em toda a ETAR. Em termos médios, verificou-se que, durante 2015, os consumos associados ao tratamento secundário representam 78% dos consumos totais da ETAR.



**Figura 47 – Indicador de energia consumida no tratamento secundário por total de energia consumida na ETAR**

#### 5.3.1.1 ESTIMATIVA DE CONSUMOS ENERGÉTICOS ASSOCIADOS AO FUNCIONAMENTO DAS TURBINAS

Tal como já mencionado, não há medições na ETAR específicas do consumo energético das turbinas mas sim para todo o tratamento secundário. Para contornar este problema, é possível através das horas de funcionamento das turbinas e da medição da corrente (instantânea) nos equipamentos fazer uma aproximação da energia requerida durante o seu funcionamento das turbinas.

Através de uma pinça digital mediram-se os parâmetros de tensão, intensidade e fator de potência, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 15.

É importante referir que não se efetuou a medição da intensidade nas turbinas 1 e 2 do lado A do tanque biológico, porque este parâmetro varia de acordo com a frequência. Ou seja, como a frequência está constantemente a ser modelada, o valor da intensidade é dinâmico. Durante o ano de 2015, a turbina 2 do tanque A ainda não dispunha de variador de frequência, mas a turbina 1 sim. Para se obter uma estimativa dos consumos energéticos e dos custos associados ao sistema de arejamento, optou-se por considerar que a intensidade destas turbinas é a mesma que se registou no tanque B (Tabela 15).

É ainda importante notar que a este pressuposto estão associados erros grosseiros, dado que a variação de velocidade de rotação das turbinas, nomeadamente a sua redução assume um notório papel no aumento da eficiência energética e consequentemente nos

custos associados. Além disso, a medição dos consumos instantâneos foram realizados em abril de 2016 e as horas de funcionamento das turbinas são referentes ao ano 2015.

**Tabela 15 – Parâmetros medidos para estimar o consumo**

Parâmetro	$U$ [V]	$I$ [A]	$\cos(\phi)$
T1, A	380	89	cos (0,908)
T2, A		55	
T3, A		55	
T4, A		54	
T1, B		89	
T2, B		55	
T3, B		49	
T4, B		56	

Utilizando as equações (10), (11) do capítulo 4, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 16. Estes resultados são relativos ao consumo energético total por turbina, durante o ano 2015.

É possível observar que há consumos nulos em julho e agosto para a turbina 1 do tanque B e janeiro e fevereiro para a turbina 3 do mesmo tanque, o que significa que nestes momentos estas turbinas estiveram inoperacionais. Também se verificam na Tabela 16 outros consumos relativamente baixos, que são indicativos de que houve problemas operacionais com as turbinas. O algoritmo prevê sempre que a turbina 1 funcione mais horas que a turbina 2, do mesmo modo que a turbina 3 funcione mais tempo que a turbina 4, sendo que estas últimas têm uma utilização menor em relação às primeiras. Na mesma tabela, nomeadamente nas últimas linhas, são apresentados os valores da média aritmética, desvio padrão e o coeficiente de erro. Nestes parâmetros estatísticos não foram considerados os valores a vermelho. Na coluna mais à direita, encontra-se o valor bruto do consumo, para o ano 2015, representado em seguida na Figura 48.

Tabela 16 - Potência ativa [kWh/mês] estimada para as turbinas

(kwh/mês)	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	Soma
Janeiro	1662	17419	9678	6376	2998	3226	0	2581	43941
Fevereiro	18527	13480	9052	2790	6262	6528	0	6092	62731
Março	19020	15511	3568	7496	10912	10513	152	9735	76907
Abril	20712	19512	12658	171	12468	12297	11994	114	89926
Mai	21389	20651	11614	1822	12810	12639	11121	702	92747
Junho	20959	20066	11310	6984	6243	11861	11557	6395	95375
Julho	21574	21697	13379	12677	0	13379	13379	12639	108724
Agosto	21790	21790	13436	8692	0	13436	13436	9071	101649
Setembro	21051	21020	11178	7287	3169	12810	12221	8179	96915
Outubro	21728	19974	10684	5769	12734	12202	11159	2638	96887
Novembro	1908	12587	9109	2960	12278	5845	10931	1120	56739
Dezembro	616	8617	11007	57	11633	10589	11007	57	53583
<b>Média</b>	20750	19738	11191	5575	12114	12192	11867	7895	
<b>Desvio padrão</b>	1183	2061	1538	3484	771	1063	979	1609	
<b>% Erro</b>	6	10	14	62	6	9	8	20	

A média anual do consumo das turbinas foi de 81344 kWh, estando os meses de abril a outubro sempre acima desse valor. Em termos percentuais, julho foi o mês onde houve um maior consumo, cerca de mais 34 % em relação à média. Por outro lado, em janeiro foi onde se verificaram os consumos mais baixos do ano de 2015, mais precisamente 46% abaixo da média anual.

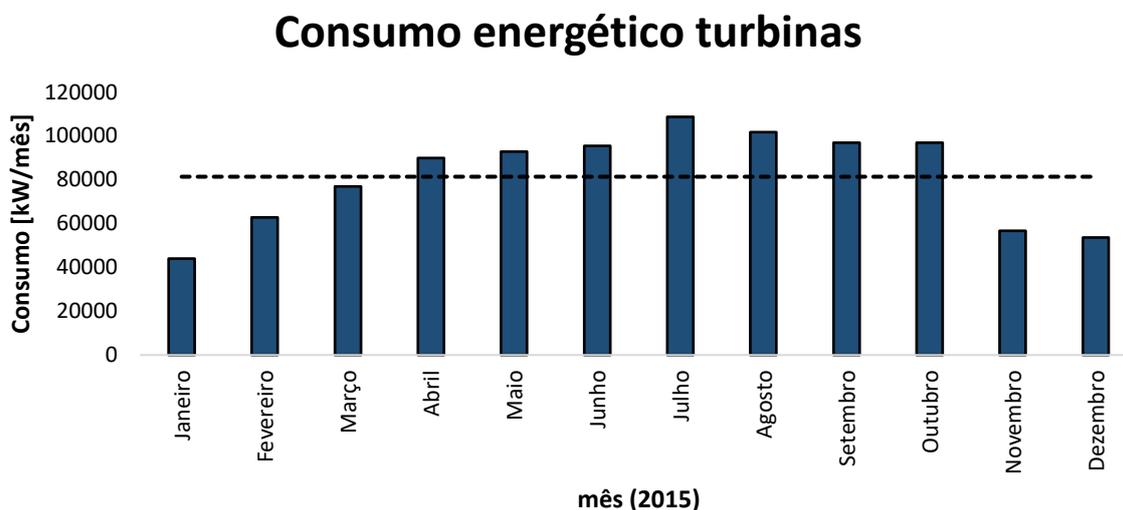
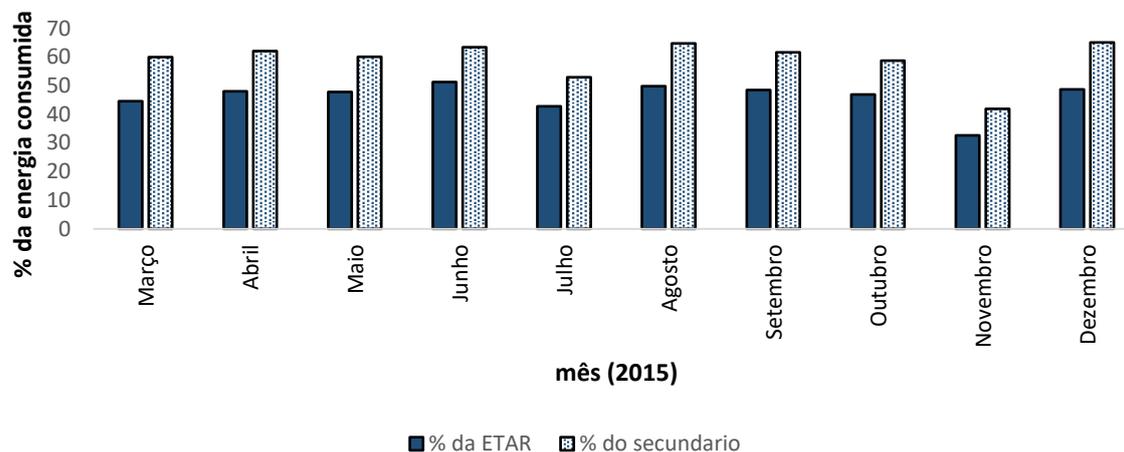


Figura 48 – Consumo energético das turbinas [kWh/mês]

É de igual forma importante perceber qual é a contribuição da energia consumida pelas turbinas no tratamento secundário e em toda a ETAR. Estes resultados encontram-se na Figura 49.

Analisando os resultados obtidos estima-se que o consumo energético associado às turbinas represente 60,1 % dos consumos no tratamento secundário e 47,0 % dos consumos energéticos de toda a ETAR.

### Consumo das turbinas

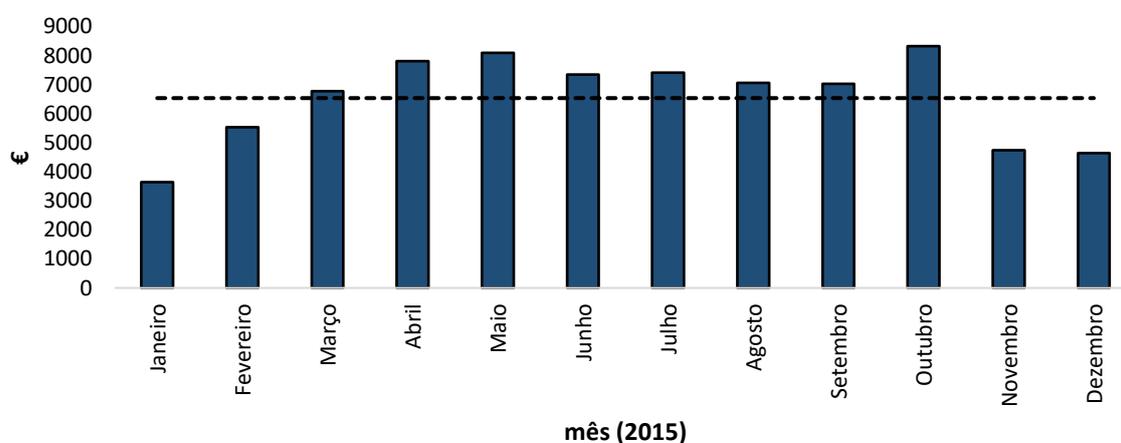


**Figura 49 – Percentagem de energia consumida pelas turbinas no tratamento secundário e na ETAR**

Para se estimar os custos associados ao funcionamento das turbinas (por mês) basta multiplicar o consumo em kWh pelo seu custo.

A ETAR de Ílhavo opera num regime de média tensão e tem uma tarifa teta-horária, pelo que o custo aproximado do kWh é de 10 cêntimos. Na Figura 50 encontram-se os custos por mês ao longo do ano de 2015, relativos ao funcionamento das turbinas.

### Turbinas - Custo



**Figura 50 - Custo total associado às turbinas durante o ano 2015**

### 5.3.2 ESTUDO ENERGÉTICO DO FUNCIONAMENTO DAS TURBINAS – CAMPANHA DE AMOSTRAGEM

#### 5.3.2.1 CONDIÇÕES BASE

Depois da montagem experimental estar operacional (Figura 22), iniciou-se a medição em contínuo de oxigénio dissolvido, da frequência do variador e da energia utilizada pelas turbinas 1 e 2 do tanque de arejamento, utilizando para tal os analisadores de energia.

Importa referir que a turbina 1 estava em modo manual durante a realização desta campanha de amostragem, isto é, apesar de ter variador de frequência, não foi possível fazer a sua variação, funcionando sempre à velocidade máxima. Esta opção foi considerada devido a se ter encontrado um problema no equipamento que fazia disparar a turbina (modo de segurança que é ativado quando um motor deteta algum problema interno no seu funcionamento, e por questões de prevenir uma avaria maior e proteger mecanicamente o equipamento, este desliga-se). Até ao momento, não foi possível perceber qual o problema nem a origem da avaria. No que respeita à turbina 2, por questões técnicas e mecânicas, a frequência máxima atingida pelo motor da turbina foi de 48 Hz.

A campanha de amostragem foi realizada nos dias 25 e 26 de junho de 2016. A temperatura rondou os 25°C em ambos os dias e não houve ocorrência de precipitação nesses dias.

Os parâmetros do algoritmo eram os seguintes (secção A1):

- Oxigénio mínimo: 0,4 ppm
- Oxigénio máximo: 1,1 ppm
- Set-point: 0,7 ppm

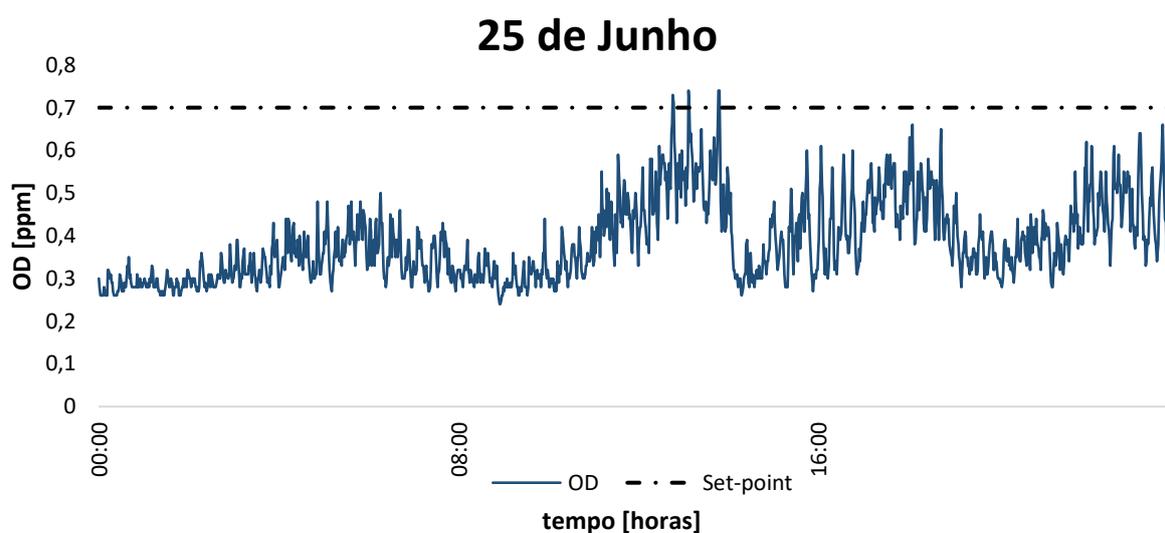
A ETAR encontrava-se a operar na “normalidade”, sendo que os parâmetros operacionais estavam, de acordo com as últimas medições efetuadas, dentro das exigências legais impostas pela licença de descarga para o meio hídrico. Na Tabela 17 encontram-se os valores do SST, CQO e CBO referentes à média o último mês.

**Tabela 17 – Parâmetros de descarga da água residual**

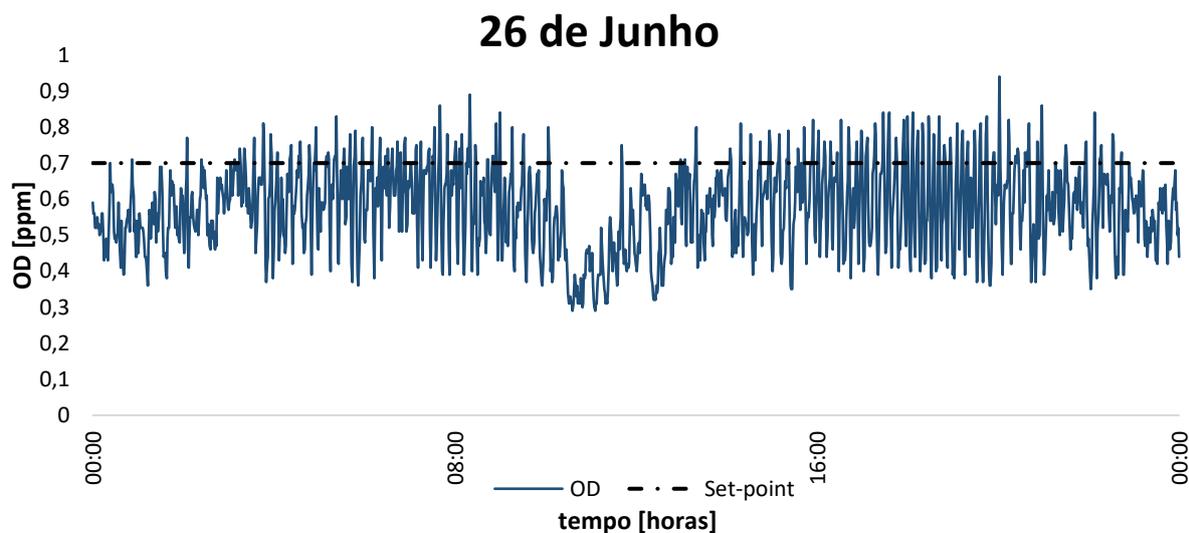
Parâmetro	
SST [mg.L <sup>-1</sup> ]	36,8
CQO [mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> ]	73,8
CBO <sub>5</sub> [mg O <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> ]	18,2

### 5.3.2.2 VARIAÇÃO DOS NÍVEIS DE OXIGÉNIO DISSOLVIDO

Na Figura 51 e na Figura 52 pode observar-se a variação do oxigénio dissolvido na água residual, para cada um dos dias da campanha de amostragem, respetivamente. Em ambas as figuras está marcado o set-point do nível de oxigénio dissolvido (linha preta a tracejado), que neste caso é constante e igual a 0,7 ppm. Pode-se observar que no dia 25, o nível de oxigénio, globalmente, não atingiu o set-point, apesar de as turbinas não terem parado de funcionar. A média diária rondou os 0,4 ( $\pm 0,09$ ) ppm. Não se conseguiu relacionar diretamente este facto com nenhum acontecimento, sendo que apenas importa referir que as características do efluente condicionam fortemente as necessidades dos microrganismos. Já no dia 26, os níveis de oxigénio apresentaram uma maior amplitude, com uma média de 0,57 ( $\pm 0,12$ ) ppm. No entanto, neste segundo dia, a aproximação ao set-point foi mais eficiente, o que tornará mais perceptível o funcionamento do algoritmo assim como a variação do consumo energético em função da frequência do motor da turbina. Por isso, optou-se por fazer uma análise mais detalhada destes parâmetros tendo por base o dia 26 de Junho.



**Figura 51 – Variação do oxigénio dissolvido para o dia 25 de Junho**



**Figura 52 - Variação do oxigênio dissolvido para o dia 26 de Junho**

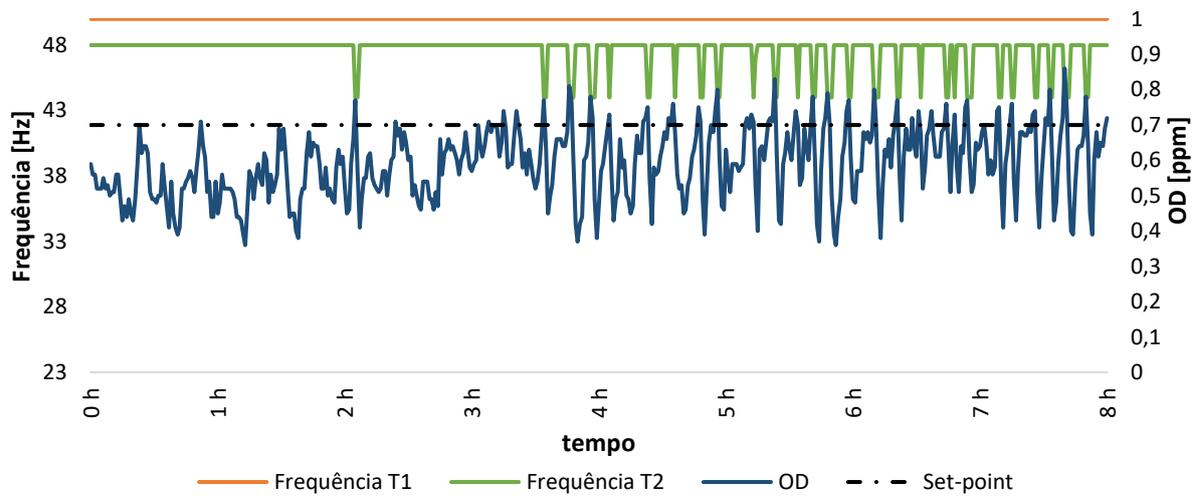
### 5.3.2.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO DO MOTOR DA TURBINA NA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÉNIO DISSOLVIDO

Com a finalidade de avaliar a influência da variação da frequência de rotação do motor da turbina na difusão do oxigénio dissolvido na água residual, cruzaram-se ambas as variáveis na Figura 53, na Figura 54 e na Figura 55 para diferentes intervalos de tempo.

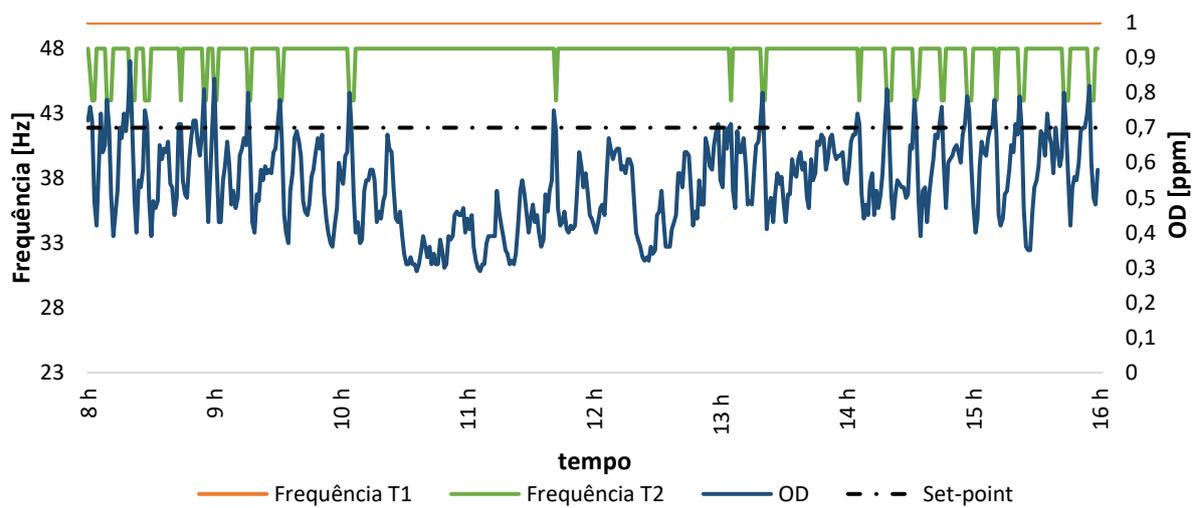
É possível observar alguns pressupostos do algoritmo anteriormente desenvolvido, nomeadamente:

- Sempre que é atingido o set-point definido, a turbina 2 reduz a frequência do motor, tendo como consequência direta a diminuição dos níveis de oxigénio dissolvido;
- Ao atingir o valor definido como oxigénio mínimo, o algoritmo fornece instruções para que se aumente a frequência de rotação das turbinas, implicando um aumento da velocidade. Este aumento, está associado a uma maior agitação da água residual, aumentando consequentemente os níveis de oxigénio.

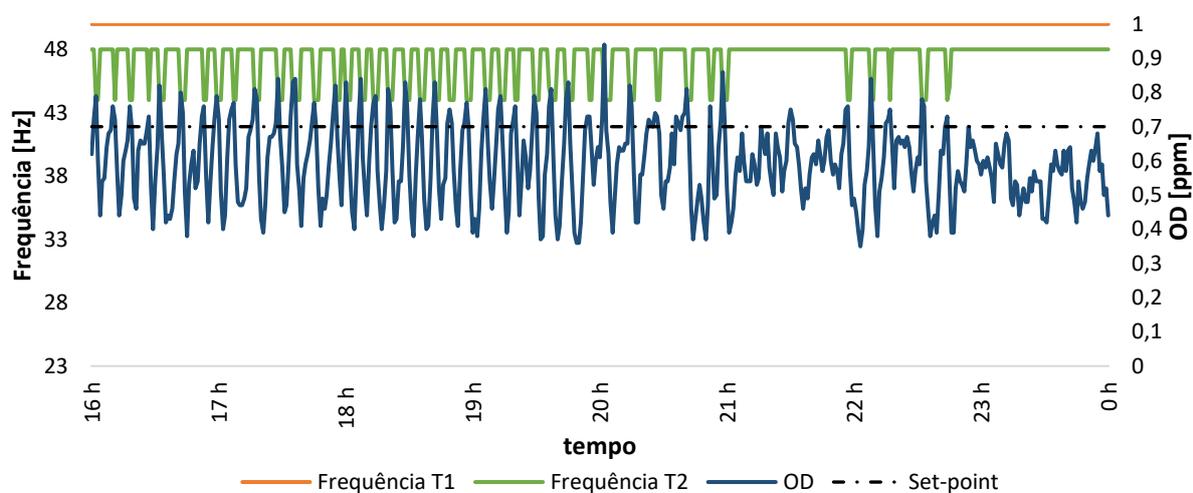
A possibilidade de variar a frequência de rotação das turbinas é um ponto crucial, dado que esta modelação permite adequar mais eficientemente os níveis de oxigénio às necessidades dos microrganismos.



**Figura 53 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigênio, entre as 0 e 8h**



**Figura 54 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigênio, entre as 8 e 16h**



**Figura 55 – Frequência de rotação do motor da turbina em função do oxigênio, entre as 16 e 0h**

#### 5.3.2.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO DO MOTOR DA TURBINA NA ENERGIA CONSUMIDA

A variação da frequência de rotação do motor está diretamente associada a uma variação no consumo de energia. A Figura 56, Figura 57 e Figura 58 ilustram os parâmetros anteriormente mencionados, para três intervalos de tempo diferentes.

Em primeiro lugar importa referir que a turbina 1 não estava a sofrer variação de frequência, pelo que globalmente, é possível observar que, em relação à turbina 2, os consumos oscilam muito mais, tendo uma maior variabilidade e mais picos energéticos, em pequenos períodos de tempo. Ao longo do dia, a turbina 1 teve, em média, um consumo de 36,7 ( $\pm 0,7$ ) kWh.

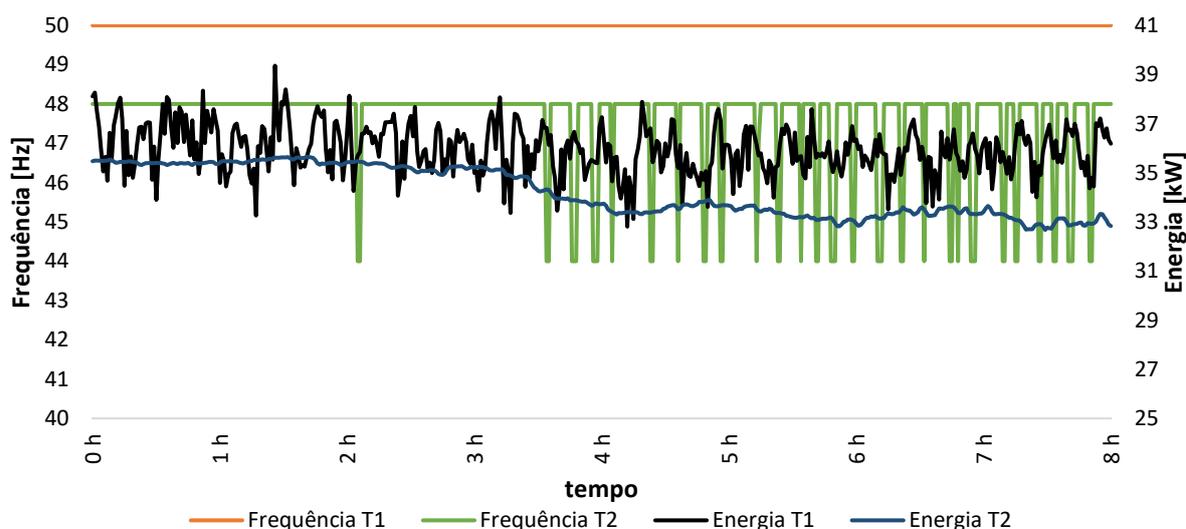
Por outro lado, a turbina 2 não apresenta picos energéticos, sendo notório que a modelação da frequência está, efetivamente, associada a uma diminuição dos consumos. Em média, a turbina 2 teve um consumo de 33,8 ( $\pm 1,4$ ) ppm.

O fator de carga define-se como a relação entre a potência elétrica fornecida e a potência do motor. A turbina 1 tem uma potência de 55 kW e a turbina 2 de 37 kW. Portanto:

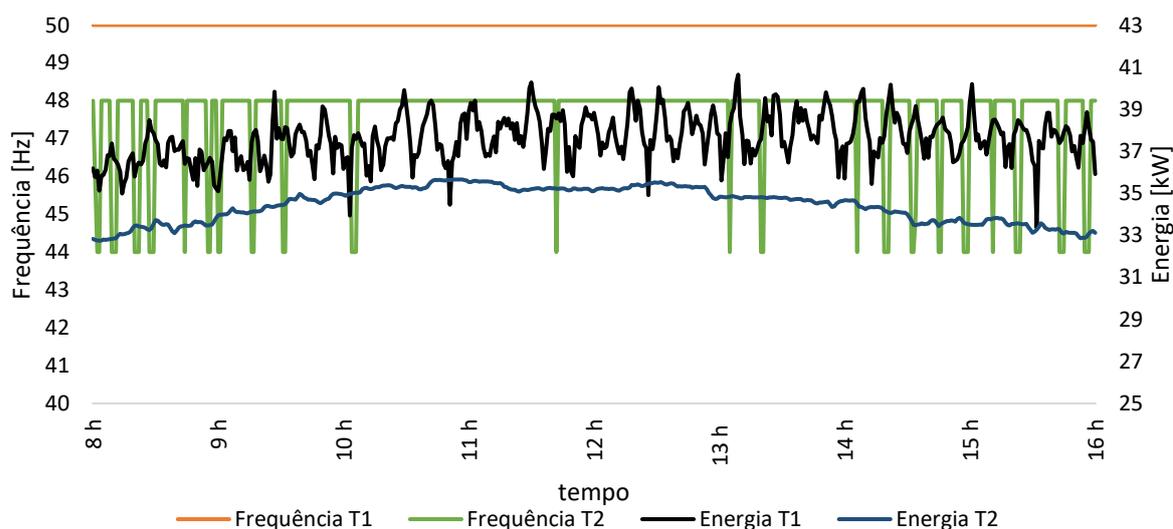
$$\text{Fator de carga}_{\text{turbina1}} = \frac{36,7}{55} \times 100 = 66 \%$$

$$\text{Fator de carga}_{\text{turbina2}} = \frac{33,8}{37} \times 100 = 91 \%$$

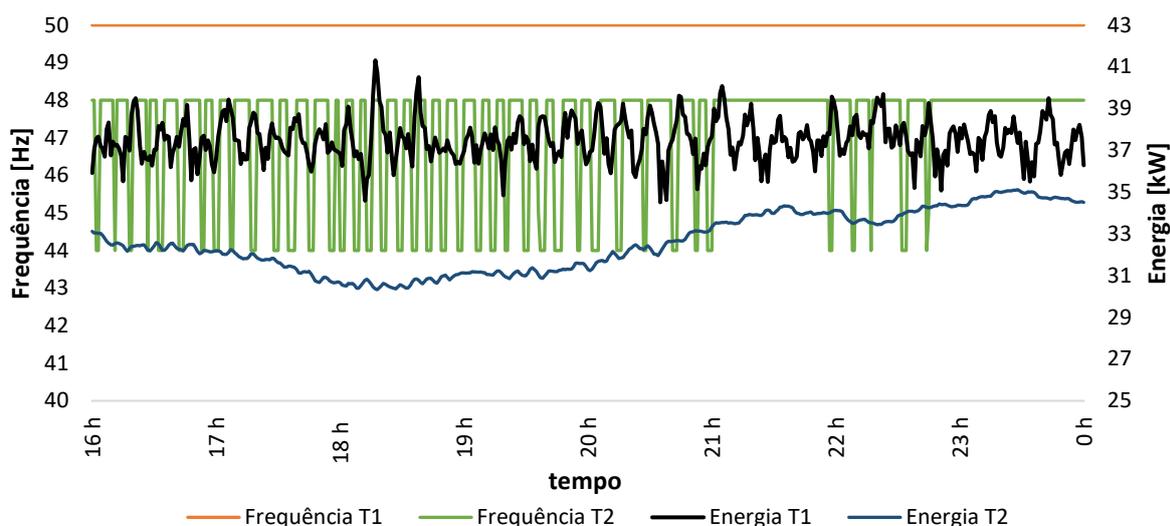
Constata-se que o rendimento da turbina 2 é consideravelmente superior à turbina 1. Em primeiro lugar, a turbina 1, tal como já referido, no momento da realização desta amostragem encontrava-se com um problema operacional que a impedia de funcionar em modo automático, sendo que não é possível estimar qual a sua influência nos consumos energéticos. Além disso, esta turbina é também aquela que funciona mais horas por dia. No ano anterior, a turbina 1 apresentou vários problemas e avarias, que no seu acumular podem também conduzir a uma diminuição do rendimento do motor.



**Figura 56 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 0 e 8h**



**Figura 57 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 8 e 16h**



**Figura 58 – Influência da frequência de rotação do motor na energia consumida, entre as 16 e 0h**

Tal como se pode observar na Figura 56, sensivelmente a partir das 3,5 h, a turbina 2 começa a variar a intensamente frequência. Seccionando, este período em dois momentos, nomeadamente antes e depois de se iniciar a modelação da frequência, tem-se que:

- Das 0h até as 3,5h

Média e desvio padrão –  $35,3 \pm 0,2$  kWh

- Das 3,5h até às 8h

Média e desvio padrão –  $33,4 \pm 0,3$  kWh

Portanto, neste caso em específico verifica-se uma diminuição dos consumos energéticos em 5%.

Do mesmo modo, na Figura 57 é perceptível que, com a diminuição da variação de frequência, há um aumento da energia consumida. De igual forma, na Figura 58 pode observar-se que entre as 18 e as 19 horas, onde houve uma intensa variação da frequência. A energia média consumida foi de  $30,7 \pm 0,2$  kWh enquanto que, entre as 23 e as 0h, onde não se registou variação de frequência, a turbina esteve a funcionar à capacidade máxima, pelo que a energia consumida foi de  $34,8 \pm 0,2$  kWh.

Durante o dia 26 de Junho, o máximo instantâneo de energia consumida registada foi de 35,5 kWh e o mínimo instantâneo foi de 28,4 kWh. Esta redução assume-se como uma redução de consumo na ordem dos 20 % .

---

## 6 CONCLUSÕES

O primeiro objetivo deste relatório de estágio focou-se na análise do funcionamento do sistema de tratamento por lamas ativadas existente na ETAR, nomeadamente: análise da eficiência do tratamento; na análise de vários parâmetros operacionais; na caracterização do sistema; e na verificação do cumprimento dos VLE para a licença de rejeição no meio hídrico. O ano em análise foi 2015.

Durante o ano de 2015, a ETAR tratou, em média, cerca de 22440 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>, estando a tratar de 57 % do caudal previsto no horizonte de projeto (2018). Já no que diz respeito à carga, neste momento a ETAR recebe 80 % do horizonte de projeto. Esta diferença, em relação ao horizonte de projeto deve-se principalmente a três factos, designadamente: infraestruturas não finalizadas (execução da rede); ligações à rede de esgotos não concluídas (ligação à rede); e quando a ETAR foi projetada foram consideradas capitações demasiado elevadas para a atualidade.

A nível do tratamento secundário, a ETAR alcança uma remoção média anual de 85 % em SST e 88% em CQO.

No que diz respeito aos parâmetros operacionais analisou-se a concentração em SST dentro do reator, a carga orgânica mássica, a carga orgânica volúmica, o TRS, o TRH, o OD e o IVL. Os resultados obtidos permitiram concluir que a ETAR opera em média carga e o sistema biológico apresenta um escoamento hidráulico que se situa entre os sistemas ideais *plug-flow (PFR)* e *complete mix (CSTR)*. O tratamento na ETAR mostrou-se eficiente, sendo que maioritariamente, durante 2015, cumpriu os limites dos requisitos legais constantes da licença para a descarga de água residuais.

Relativamente à concentração de MLSS a média anual foi de 5356 mg.L<sup>-1</sup>. Tanto para um sistema de lamas ativadas do tipo *PFR* como do tipo *CSTR*, esta concentração é superior ao recomendado pela bibliografia (34 % e 79 % para *PFR* e *CSTR*, respetivamente).

O TRH foi de 8,4 h, ou seja, em média, a água residual permanece pouco mais de 8 horas no tanque biológico. Globalmente em 2015, não se verificaram grandes desvios à média, sendo que o máximo excedido foi de aproximadamente 10%.

A carga orgânica volúmica que representa a quantidade de matéria orgânica aplicada ao sistema por dia foi de 0,675 kg CBO m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>. Durante o ano de 2015, este parâmetro variou entre 0,6 e 0,7 e não se registaram variações significativas.

A carga orgânica mássica, que representa a relação entre o caudal mássico de substrato alimentado e a quantidade de biomassa contida no reator, foi, em média, de 0,22 kg CBO.kgVSS<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>. Entre Maio e Setembro registaram-se médias cerca de 20 % abaixo da média.

O TRS apresentou uma média anual de 7,2 dias, ou seja, os microrganismos permanecem, em média, no sistema biológico uma semana. Registaram-se picos em Maio e Agosto significativamente superiores à média (~30%).

Relativamente aos níveis de oxigénio dissolvido na água residual embora o *Metcalf & Eddy* recomende a concentração de oxigénio entre 1 e 2 ppm, a ETAR de Ílhavo basta 0,7 ppm na secção A1 e B1 e 0,2 ppm (apenas concentração residual) à saída. Deste modo, a redução do oxigénio dissolvido está associado a uma menor utilização das capacidades das turbinas, o que consequentemente implica uma redução de custos. Em média, o tanque A teve uma concentração de OD de 0,73 ppm na zona intermédia e à saída de 0,58 ppm, verificando-se uma redução de 20 % ao longo do tanque. No tanque B a concentração na zona intermédia foi de 0,52 ppm e à saída 0,41 ppm, registando-se neste tanque uma diminuição ao longo do tanque de 17 %.

O segundo objetivo deste relatório está relacionado com a análise do funcionamento do sistema de arejamento das lamas ativadas, designadamente das turbinas. Para isso foram estabelecidos três objetivos específicos, sendo estes: análise do funcionamento do sistema de arejamento através da elaboração e estudo do seu algoritmo; proposta de alteração do algoritmo base; e criação de uma nota técnica sobre o novo funcionamento do sistema.

Após a análise das instruções do funcionamento dos equipamentos de arejamento da PRIDESA foi elaborado um algoritmo base. Posteriormente, testou-se a sua integridade. Após 3 testes operacionais simples baseados na alteração de tempos dispostos no algoritmo concluiu-se que o funcionamento das turbinas não estava a seguir qualquer padrão conhecido. Além disso, verificou-se que o algoritmo possuía três limitações, em específico, não previa a possibilidade de apenas com a turbina 1 alcançar o O<sub>2</sub> mínimo e máximo, não sendo necessário o arranque da turbina 2 para fornecer oxigénio; não previa a possibilidade de, em vez de parar as duas turbinas, parar apenas a turbina 2, e só posteriormente parar a turbina 1, para que os níveis de oxigénio não sofram um decaimento tão acentuado; e o facto de o arranque das turbinas ser apenas função do tempo estabelecido. Dadas estas conclusões, criaram-se dois novos algoritmos, que fossem mais eficientes.

---

Foram desenvolvidos dois algoritmos, distintos e adaptados ao facto de as turbinas possuírem ou não variador de frequência, seguindo novos pressupostos de forma a colmatar as limitações do anterior. Apesar de terem sido elaborados dois algoritmos, ambos são baseados segundo o mesmo seguimento lógico, com tempos equiparáveis e com nova nomenclatura mais perceptível para o utilizador. No final foi elaborado uma nota técnica que foi entregue tanto na direção da ETAR de Ílhavo como aos operadores, de forma a facilitar a compreensão e operação do sistema.

O terceiro e último objetivo do estágio foi relativo ao estudo energético do tratamento secundário, tendo-se para isso definido três objetivos específicos: estudo energético do tratamento secundário, estudo energético das turbinas (2015) e estudo energético das turbinas com variador de frequência através da realização de uma campanha de amostragem.

No que diz respeito ao tratamento secundário, para o ano de 2015, obteve-se um consumo energético médio de 4926 kW.d<sup>-1</sup> que representa 78 % dos consumos de energia em toda a ETAR.

Relativamente aos consumos das turbinas para o ano 2015, verificou-se que o mês de Julho foi aquele onde se registaram os maiores consumos, sendo as turbinas 1 e 2 as que mais consumiram energia. No global, o consumo médio das turbinas foi de 81344 kWh/mês, traduzindo-se num custo de aproximadamente 6500 € por mês. Estimou-se que os consumos associados ao funcionamento das turbinas representam 60,1 % dos consumos energéticos no tratamento secundário e 47,0 % dos consumos energéticos da ETAR.

A campanha de amostragem foi realizada nos dias 25 e 26 de Junho de 2016, momento em que já estava implementado o novo algoritmo, e teve como finalidade acompanhar o funcionamento das turbinas com variador de frequência e em particular, perceber as variações do consumo energético mediante a variação de frequência e do oxigénio dissolvido. Apesar de ambas as turbinas possuírem os variadores, apenas a turbina 2 efetivamente fez variação da frequência de rotação das turbinas. A turbina 1 estava com problemas operacionais, nomeadamente, parava o seu funcionamento durante o modo automático (modo algoritmo), tendo por isso havido a necessidade de operar em modo manual.

No dia 25 de junho, o nível de oxigénio, globalmente, não atingiu o set-point (média 0,4 (±0,09)), apesar de as turbinas não terem parado de funcionar. Já no dia 26 de junho, os níveis de oxigénio apresentaram uma maior amplitude, com uma média de 0,57 (±0,12). Por este motivo, optou-se por analisar apenas o segundo dia de amostragem.

A amostragem experimental permitiu validar alguns pressupostos do algoritmo desenvolvido, tendo-se verificado a redução da velocidade de rotação das turbinas sempre que é atingido o set-point do nível de OD e vice-versa. Durante o segundo dia de amostragem, a turbina 1 teve, em média, um consumo de 36,7 ( $\pm 0,7$ ) kWh e a turbina 2 teve um consumo de 33,8 ( $\pm 1,4$ ) kWh, o que se traduz num fator de carga de 66 % e 91 % respetivamente. A turbina 1 no período da campanha estava com problemas operacionais, pelo que pode ter condicionado os resultados. A turbina 2 apresentou um fator de carga elevado, pelo que se conclui que está a operar em boas condições.

No global, a campanha realizada permitiu verificar que a utilização de variadores de frequência provoca uma menor oscilação na energia consumida, eliminando os picos de consumo. Além disso, há uma redução da energia consumida com a variação de frequência entre 5 % a 20%.

Como limitações e dificuldades do trabalho desenvolvido na ETAR, é importante referir alguns pontos, designadamente, a complexidade de montagem e operação com os analisadores de energia e as múltiplas avarias e problemas operacionais que apareceram ao longo do estágio principalmente ao nível das turbinas e que condicionaram as campanhas de amostragem. O reduzido tempo de estágio (5 meses) não permite que a escala temporal seja compatível com a resolução de todos os problemas. A criação de um novo algoritmo mais ajustado ao funcionamento do sistema de arejamento, bem como a elaboração da respetiva nota técnica, foi um produto deste estágio que permitiu sintetizar informação de forma mais eficaz e simples para os operadores. Em suma, a experiência do estágio na ETAR de Ílhavo foi muito positiva, permitindo-me adquirir um enorme leque de conhecimentos necessários para o desenvolvimento deste relatório. Além disso, deu-me a oportunidade de conhecer não só a ETAR, como várias estações elevatórias e mini-etar do grupo AdCL, bem como acompanhar e participar em outras tarefas que contribuiram para o meu crescimento académico, profissional e pessoal.

Como estudo futuro sugere-se a realização de novas campanhas de amostragem, mais extensas e a ser realizadas quando todos os equipamentos de arejamento estiverem operacionais. A realização de uma análise mais detalhada e pormenorizada de todos os parâmetros de interesse energético seria de especial interesse para as seguintes situações:

- Comparação dos consumos energéticos entre tanque A e o tanque B, estando ambos os variadores na secção A1.

- 
- Comparação dos consumos energéticos entre tanque A e o tanque B, estando o variador na turbina 1 da seção A1 e na turbina 1 da seção B1.



---

## 7 BIBLIOGRAFIA

- [1] A. M. Karpinska and J. Bridgeman, "CFD-aided modelling of activated sludge systems e A critical review Standard Method of Moments," *Water Res.*, vol. 88, pp. 861–879, 2016.
- [2] H. Mogens, M. Loosdrecht, G. Ekama, and D. Drdjnovic, *Biological Wastewater Treatment - Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, 2008.
- [3] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering - Treatment and resource recovery*, 5th ed. 2014.
- [4] Water Environmental Federation, *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants - Volume II: Liquid Processes*, 6th ed. Mc Graw Hill, 2008.
- [5] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, and M. Köttner, "Biogas Handbook.–University of Southern Denmark Esbjerg," 2008.
- [6] F. Morais, "Estudo de um novo processo de tratamento de águas residuais urbanas visando a minimização das dificuldades operacionais do processo de lamas ativadas e sua aplicabilidade em países carenciados de energia e tecnologia," Universidade do Porto, 2013.
- [7] E. Diaz, A. Mohedano, and L. Calvo, "Hydrogenation of phenol in aqueous phase with palladium on activated carbon catalysts," *Chem. Eng. ...*, 2007.
- [8] S. Lin and C. Lee, "Water and Wastewater Calculations," 2007.
- [9] S. Gonçalves, "Análise e optimização do desempenho da ETARI da Prio Biocombustíveis," Universidade de Aveiro, 2013.
- [10] P. Silva, "Capacidade de nitrificação e desnitrificação da ETAR Sul da SIMRIA," Universidade de Aveiro, 2013.
- [11] Agência Portuguesa do Ambiente, "Guia para a Avaliação de Impacte das Estações de Tratamento de Águas Residuais," 2008.
- [12] D. L. Cotrim, "Otimização das condições de arejamento do tratamento biológico da ETAR da Ericeira," Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [13] N. P. Cheremisinoff, *Biotechnology for Waste and Wastewater Treatment*. 1997.
- [14] A. S. M. M. Ameixoeiro, "Optimização do tratamento biológico com o sistema Bioamp GT , em águas residuais," Unversidade de Aveiro, 2008.

- [15] N. Gray, *Biology of Wastewater Treatment*, 2nd ed. Imperial College Press, 2004.
- [16] J. P. Sousa, “Caracterização da decantabilidade das lamas activadas da etar de sobreiras, Porto, via determinação fisiológica global através da monitorização de sour,” Universidade do Porto, 2011.
- [17] W. W. Eckenfelder and P. Grau, *Activated Sludge Process Design and Control: theory and practice*. Technomic Publishing Company, 1992.
- [18] M. de F. R. Meireles, “Optimização da Estação de Tratamento de Águas Residuais de Crestuma,” Instituto Superior de Engenharia do Poto, 2011.
- [19] W. W. Eckenfelder, *Industrial Water Pollution Control*, 3rd ed. McGraw Hill International Editions - Environmental Engineering Series, 2000.
- [20] M. von Sperling, “Activated sludge and aerobic biofilm reactors,” 2007.
- [21] Eduardo Ronzano and J. L. Dapena, *Tratamiento biológico de las aguas residuales*. Diaz de Santos, 2002.
- [22] Foladori, Vaccari, and Vitali, “Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned,” vol. 1739, pp. 1–13, 2015.
- [23] R. Hreiz, M. A. Latifi, and N. Roche, “Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art,” *Chem. Eng. J.*, vol. 281, pp. 900–920, 2015.
- [24] C. Silva and M. J. Rosa, “Energy performance indicators of wastewater treatment: a field study with 17 Portuguese plants,” *Water Sci. Technol.*, vol. 72, no. 4, p. 510, 2015.
- [25] SGS Portugal, “ISO 50001 - Certificação - Sistema de Gestão da Energia,” 2016. [Online]. Available: <http://www.sgs.pt/pt-PT/Training-Services/Environment/Energy-Management/ISO-50001-Energy-Management-Systems-Certification.aspx>. [Accessed: 24-Feb-2016].
- [26] S. C. Gutiérrez-Gutiérrez, F. Coulon, Y. Jiang, and S. Wagland, “Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities,” *Waste Manag.*, vol. 42, pp. 128–136, 2015.
- [27] M. C. Ozturk, F. Martin Serrat, and F. Teymour, “Optimization of aeration profiles in the activated sludge process,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 139, pp. 1–14, Jan. 2016.
- [28] M. T. Au, J. Pasupuleti, and K. H. Chua, “Strategies to improve energy efficiency in sewage treatment plants,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 16, p. 12033, 2013.

- 
- [29] I. Lee, H. Lim, B. Jung, M. F. Colosimo, and H. Kim, "Evaluation of aeration energy saving in two modified activated sludge processes.," *Chemosphere*, vol. 140, pp. 1–7, 2014.
- [30] M. C. Ozturk and F. Teymour, "Bifurcation Analysis of Wastewater Treatment Processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 45, pp. 17736–17752, Nov. 2014.
- [31] M. Fikar, B. Chachuat, and M. A. Latifi, "Optimal operation of alternating activated sludge processes," *Control Eng. Pract.*, vol. 13, no. 7, pp. 853–861, 2005.
- [32] B. Chachuat, N. Roche, and M. A. Latifi, "Optimal aeration control of industrial alternating activated sludge plants," *Biochem. Eng. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 277–289, May 2005.
- [33] S. Balku and R. Berber, "Dynamics of an activated sludge process with nitrification and denitrification: Start-up simulation and optimization using evolutionary algorithm," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 490–499, 2006.
- [34] L. Åmand and B. Carlsson, "Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process," *Water Res.*, vol. 46, no. 7, pp. 2101–2110, 2012.
- [35] D. Mamais, C. Noutsopoulos, A. Dimopoulou, A. Stasinakis, and T. D. Lekkas, "Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions," *Water Sci. Technol.*, vol. 71, no. 2, p. 303, 2015.
- [36] EDP, "Soluções de eficiência PME." [Online]. Available: <https://energia.edp.pt/media/566250/eficiencia-pme-vev.pdf>. [Accessed: 04-Jul-2016].
- [37] Iberdrola, "Manual de boas práticas energéticas."
- [38] Grupo de Águas de Portugal, "Águas do Centro Portugal," 2015. [Online]. Available: <http://www.aguasdocentrolitoral.pt/pt/aguas-do-centro-litoral/quem-somos/?id=10>. [Accessed: 28-Dec-2015].
- [39] PRIDESA - Tratamiento de Águas y Resíduos, *Memória descritiva - SIMRIA - Sistema multimunicipal de Aveiro : Etar de Ílhavo*. .
- [40] J. Brandão, "Otimização da produção de biogás com recurso a redes euronais artificiais," Instituto Superior em Engenharia do Porto, 2014.



---

## **8 ANEXOS**

## Anexo A

**PARTE A - INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO**

---

**3.1 BIOLÓGICO**

É constituído pelos seguintes equipamentos:

- TURBINA GRANDE DE AREJAMENTO (2), (03.A1.04)
- TURBINA MÉDIA DE AREJAMENTO (2), (03.B1.04)
- TURBINA PEQUENA DE AREJAMENTO (4), (03.C1.04)
- MEDIDOR DE OXIGÉNIO NO BIOLÓGICO (4), (03.03.01)

**PARTE A - INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO**

---

<b>CÓDIGO</b>	<b>03.A1.04</b>
<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>TURBINA GRANDE DE AREJAMENTO</b>
<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>BIOLÓGICO</b>
<b>QUANTIDADE</b>	<b>2 (A e B)</b>

**1.- GENERALIDADES.**

Têm a função de oxigenar o biológico. Há uma turbina por linha, isto é, no tanque A está a turbina A e no tanque B a turbina B. Está colocada à entrada de água no biológico e tem uma potência de 55 kw.

**2.- ELEMENTOS DE COMANDO**

- Selectores: No CCM, selector automático/paragem/manual
  - Botoneira local: Em campo, pulsador de paragem de emergência.
  - Sinóptico: Automático/manual/paragem, por acção do rato/teclado

**3.- SINALIZAÇÃO**

- No Sinóptico: Mediante cor vermelha (paragem), verde (em funcionamento) e vermelho intermitente (avaria). Indicação do estado (automático/manual/local). Indicação das horas de funcionamento.
- No CCM: Mediante lampadas, vermelha (avaria) e verde (funcionamento) vermelha e verde apagadas (paragem).

**PARTE A - INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO**

---

**4- FUNCIONAMENTO.**

- Manual: Mediante o selector no CCM, ao critério do operador.
- Local: Mediante botoneira local, ao critério do operador.
- Automático: Em automático funciona em continuo segundo a informação indicada pelos medidores de O<sub>2</sub>.

PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO

---

CÓDIGO	03.C1.04
EQUIPAMENTO	TURBINA PEQUENA DE AREJAMENTO
LOCALIZAÇÃO	BIOLÓGICO
QUANTIDADE	4 (A, B, C e D)

1.- GENERALIDADES.

Têm a função de oxigenar o biológico. Há duas turbinas por linha, isto é, no tanque A estão as turbinas A e B. No tanque B estão as turbinas C e D. Estão colocadas na terceira e quarta zona do biológico e têm uma potência de 30 kw.

2.- ELEMENTOS DE COMANDO

- Selectores: No CCM, selector automático/paragem/manual
- Botoneira local: Em campo, pulsador de paragem de emergência.
- Sinóptico: Automático/manual/paragem, por acção do rato/teclado

3.- SINALIZAÇÃO

- No Sinóptico: Mediante cor vermelha (paragem), verde (em funcionamento) e vermelho intermitente (avaria). Indicação do estado (automático/manual/local). Indicação das horas de funcionamento.
- No CCM: Mediante lampadas, vermelha (avaria) e verde (funcionamento) vermelha e verde apagadas (paragem).

**PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO**

---

**4.- FUNCIONAMENTO.**

- Manual: Mediante o selector no CCM, ao critério do operador
- Local: Mediante botoneira local, ao critério do operador.
- Automático: Em automático funciona em continuo segundo as informações indicadas pelos medidores de O<sub>2</sub>

**PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO**

<b>CÓDIGO</b>	<b>03.03.01</b>
<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>MEDIDOR DE OXIGÉNIO</b>
<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>BIOLÓGICO</b>
<b>QUANTIDADE</b>	<b>4 (A 1, B1, A2 e B2 )</b>

**1.- GENERALIDADES.**

Cada linha de tratamento (cada tanque) do reactor biológico dispõem de dois medidores de oxigénio dissolvido. Um situa-se a meio do tanque e o outro na saída do tanque do reactor biológico.

Os medidores repartem-se da seguinte forma :

<u>TANQUE</u>	<u>A MEIO</u>	<u>NA SAÍDA</u>
A	A1	A2
B	B1	B2

**Medidor à saída :**

Este medidor de oxigénio dissolvido encarrega-se de indicar o oxigénio existente na parte final da zona aeróbia do biológico. O medidor de oxigénio envia um sinal de 4-20 mA ao PLC. O sistema de controlo utiliza este sinal para indicar :

- O oxigénio dissolvido na zona de saída (ppm) no computador.
- O nível máximo, mínimo e médio registado na zona de saída (ppm) no computador
- Os valores de oxigénio que vão sendo registados são armazenados para a realização dos relatórios e registos históricos.
- Cada medidor de O<sub>2</sub>, têm incluídos dois Set Point ou parâmetros, que são variáveis e modificáveis no sinóptico através do rato e teclado.  
O sinal analógico permite as seguintes tarefas de :
  - Paragem/arranque das TURBINAS DE AREJAMENTO (03.C1.04).

## PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO

---

Medidor situado a meio do tanque:

Este medidor de oxigénio dissolvido encarrega-se de indicar o oxigénio existente a meio do tanque do reactor biológico. O medidor de oxigénio envia um sinal de 4-20 mA ao PLC. O sistema de controlo utiliza este sinal para indicar:

-Indicação do oxigénio dissolvido a meio do tanque (ppm) no computador.

- Nível máximo, mínimo e médio registado a meio do tanque no computador.

Os valores que vão sendo registados são armazenados para a realização dos relatórios e registos históricos.

O sinal analógico permite as seguintes tarefas :

- Paragem/arranque das TURBINAS DE AREJAMENTO (03.A1.04 y 03.B1.04).

### *SEQUÊNCIA DE AREJAMENTO NO REACTOR BIOLÓGICO*

Partindo desde a seguinte situação: todas as turbinas da zona estão paradas; e o O<sub>2</sub> medido na zona, menor que o 1º Set Point

- (A)- Coloca-se em funcionamento a 1ª turbina (1ª no sentido do fluxo) e alternadamente um temporizador -t1- (de tempo ajustável no sinóptico).
- (B1)- O O<sub>2</sub> na zona, chega ao 1º Set Point antes de que termine -t1-.

Neste caso, realizam-se as seguintes acções

: a 1ª turbina entra em funcionamento;  
inicia-se o funcionamento do temporizador -t2- (de tempo ajustável no sinóptico);  
e coloca-se a zero o temporizador -t1-.

PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO

- (B2)- O O2 na zona, não chega ao 1º Set Point quando termina -t1 -.Neste caso, realizam-se as seguintes acções:
- a 1ª turbina permanece em funcionamento; arranca a 2ª turbina; e coloca-se em funcionamento o temporizador -t2-.

(B1.1)- O O2 na zona, chega ao 2º Set Point antes de que termine -t2-.

Neste caso, realizam-se as seguintes acções: a 1ª turbina pára; coloca-se em funcionamento o temporizador -t4- (de tempo ajustável no sinóptico); e coloca-se a zero o temporizador -t2-.

(B1.2)- O O2 na zona, não chega ao 2º Set Point quando termina -t2-.  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções: a 1ª turbina permanece em funcionamento; coloca-se em funcionamento a 2ª turbina; e coloca-se em funcionamento o temporizador -t3-.

(B1.2.1)- O O2 na zona, chega ao 2º Set Point antes de que termine -t3-  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções: a 1ª e 2ª turbinas param;  
colocam-se em funcionamento o temporizador -t4- (de tempo ajustável no sinóptico);  
e coloca-se a zero o temporizador -t3-.

(B1.2.2)- O O2 na zona, não chega ao 2º Set Point quando termina -t3-.  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções: a 1ª e 2ª turbinas permanecem em marcha

(B1.2.2.1)- O O2 na zona, chega ao 2º Set Point um tempo (indeterminado)  
depois de ter finalizado o temporizador -t3  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções:  
a 1ª e 2ª turbinas param; e coloca-se em funcionamento o temporizador -t4-

(B2.1)- O O2 na zona, chega ao 2º Set Point antes que termine -t2-.  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções  
a 1ª e 2ª turbinas param; inicia-se o funcionamento do temporizador -t4-; e  
coloca-se a zero o temporizador -t2-.

(B2.2)- O O2 na zona, não chega al 2º Set Point quando termina -t2-.  
Neste caso, realizam-se as seguintes acções:  
a 1ª e 2ª turbinas permanecem em funcionamento.

(B2.2.1)- O O2 na zona, chega ao 2º Set Point um tempo (indeterminado)  
depois de ter finalizado -t2-. Neste caso, realizam-se as seguintes acções  
a 1ª e 2ª turbinas param, e coloca-se em funcionamento o temporizador -t4-.

## PARTE A – INSTRUÇÕES DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO E DA INSTALAÇÃO

---

Em todos os casos, depois de ter alcançado o 2º Set Point e arrancado o temporizador -t4 espera-se que todas as turbinas estejam paradas, até finalizar -t4-. Nesse momento, a medida de O2 estará sempre por debaixo do 2º Set Point, mas poderá estar a cima do 1º Set Point (situação -C-) ou a baixo deste (situação -A-).

( C)- O - O2 na zona, encontra-se entre o 1º e 2º Set Point. Neste caso, realizam-se as seguintes acções:  
inicia-se o funcionamento da 1ª turbina; e coloca-se em funcionamento o temporizador -t2-, o ciclo continua desde a situação -B1

## Anexo B

# Nota técnica

---

Funcionamento das turbinas do tanque de  
arejamento

**ETAR de Ílhavo**



## Resumo

---

A presente nota técnica foi desenvolvida no âmbito da tese de mestrado, em Engenharia do Ambiente da aluna Adriana Filipa Oliveira Sousa (n.º mec: 60490) da Universidade de Aveiro no ano letivo 2015/2016, sob a orientação do Engenheiro Milton Fontes e da Professora Isabel Capela, intitulada de “*Otimização do funcionamento do sistema de arejamento da ETAR de Ílhavo da AdCL, S.A.*”.

O seu propósito resulta da necessidade da alteração do modelo de funcionamento das turbinas de arejamento da ETAR de Ílhavo da Águas do Centro Litoral, S.A. com vista à otimização a nível energético e mecânico.

Neste sentido, foram desenvolvidos dois algoritmos que esquematizam o funcionamento das turbinas com e sem variador de velocidade.

## Tanque de arejamento

Para satisfazer as necessidades de oxigénio no tanque de arejamento, a ETAR tem cerca 8 turbinas (4 em cada: 2 turbinas grandes, 2 médias e 4 pequenas).

Na Figura 1 está apresentado esquematicamente a distribuição destas turbinas. As turbinas nº1 têm uma potência de 55 kw, as turbinas nº2 têm 37 kw e as restantes apresentam 30 kw [37]. A nível de nomenclatura, o lado direito é, doravante, designado por tanque A e o lado esquerdo por tanque B. Os tanques são divididos em quatro setores:

- A turbina 1 e 2 do tanque A constituem a zona A1;
- A turbina 3 e 4 do tanque A constituem a zona A2;
- A turbina 1 e 2 do tanque B constituem a zona B1;
- A turbina 3 e 4 do tanque B constituem a zona B2;

Nas turbinas assinaladas a laranja foram instalados dois variadores de frequência, um em dezembro de 2014 e outro em dezembro de 2015. Ambos os variadores foram instalados no tanque A. Os variadores de frequência implicam uma variação na velocidade das turbinas, dado que a sua relação é proporcional. Ou seja, o aumento da frequência implica um aumento da velocidade na rotação das turbinas e a diminuição da frequência implica a diminuição da velocidade.

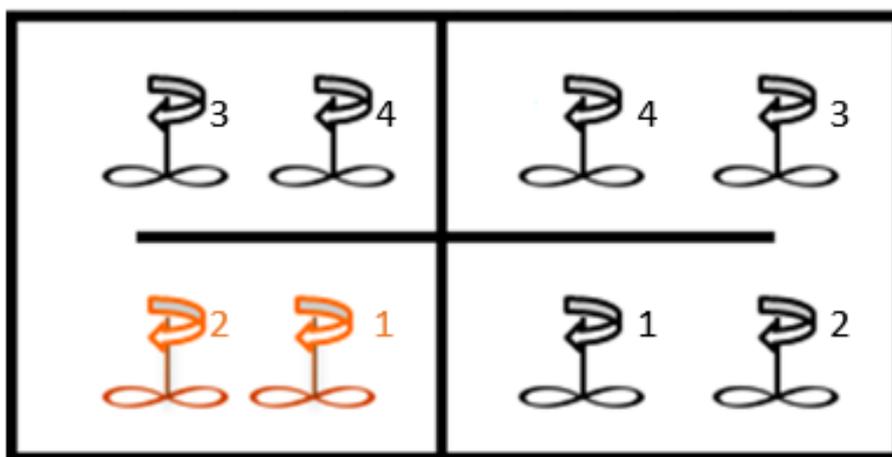


Figura 1 – Esquema das turbinas do tanque de arejamento

## Algoritmo sem variador de velocidade

---

### Nomenclatura:

$t$  – Tempo;

$t_1$  – Tempo máximo de paragem do arejamento;

$t_2$  – Tempo para arranque da turbina 2;

$t_3$  – Tempo de paragem da turbina 2;

$t_4$  – Tempo para garantir a mistura;

$T1$  – Turbina 1;

$T2$  – Turbina 2;

$O_2$  – Oxigénio;

$O_{2min}$  – Oxigénio mínimo;

$O_{2máx}$  – Oxigénio máximo;

### Modo de funcionamento:

1. A condição zero assume que ambas as turbinas estão paradas. O tempo começa a contar. Quando é detetado a concentração de oxigénio mínimo, arranca a turbina 1. Caso contrário, arranca assim que o tempo ultrapasse  $t_1$ .
2. A turbina 1 está em funcionamento. O tempo volta a zerar havendo duas possibilidades:
  - a. A turbina 1 atinge o  $O_2$  mínimo antes de exceder  $t_2$ . Após um certo tempo atinge o  $O_2$  máximo, parando a turbina. Quando o tempo ultrapassa  $t_4$  sem que seja atingido o  $O_2$  máximo, arranca a turbina 2.
  - b. A turbina 1 não atinge o  $O_2$  mínimo antes que o tempo ultrapasse  $t_2$ . Nesse caso é dada a ordem de arranque da turbina 2.
3. As turbinas ficam em funcionamento até que seja atingido o  $O_2$  máximo. Quando o  $O_2$  máximo é atingido, apenas a turbina 2 pára. O tempo volta ao zero. Assim o tempo ultrapassa  $t_3$ , o ciclo retoma o tópico 2.

### Algoritmo sem variador

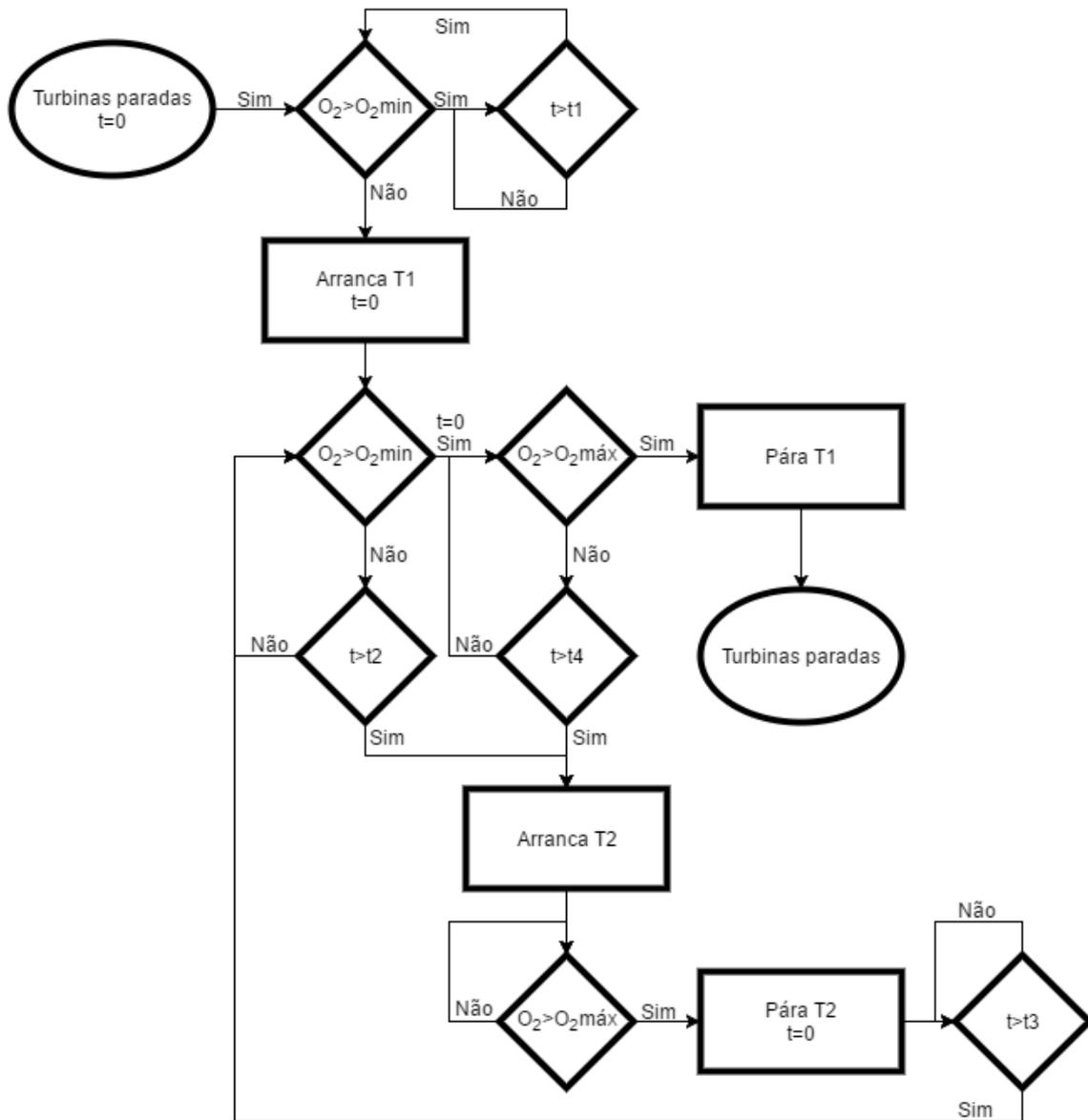


Figura 2 – algoritmo de funcionamento das turbinas sem variador de velocidade

## Algoritmo com variador de velocidade

---

### Nomenclatura:

$t$  – Tempo;

$t_1$  – Tempo máximo de paragem do arejamento;

$t_2$  – Tempo para arranque da turbina 2;

$t_3$  – Tempo de paragem da turbina 2;

$T1$  – Turbina 1;

$T2$  – Turbina 2;

$O_2$  – Oxigénio;

$O_2min$  – Oxigénio mínimo;

$O_2máx$  – Oxigénio máximo;

$SP$  – set-point do oxigénio;

### Modo de funcionamento:

1. A condição zero assume que ambas as turbinas estão paradas. O tempo começa a contar. Quando o oxigénio é menor que o  $O_2min$ , arranca a turbina 1. Caso contrário, arranca assim que o tempo ultrapasse  $t_1$ . O arranque da turbina é feito a frequência mínima do motor, 23 Hz. O tempo volta ao início:
2. A turbina 1 está em funcionamento:
  - a. O  $O_2$  encontra-se abaixo do set-point estabelecido.
    - i. Enquanto a frequência for inferior a 50 Hz, esta vai incrementando gradualmente, aumentando assim a velocidade de rotação da turbina. Quando chega à frequência máxima de 50 Hz e o tempo é maior que  $t_2$ , então a turbina 2 arranca.
  - b. O  $O_2$  encontra-se acima do set-point estabelecido. A frequência vai diminuindo gradualmente até ao mínimo de 23 Hz. No caso de à frequência mínima, o  $O_2$  continuar acima do set-point então:
    - i. Se estiver acima do  $O_2 máx$ , a turbina 1 pará.

- ii. Se estiver abaixo do  $O_2$  máximo, retoma-se o tópico 2.
3. A turbina 2 arranca à frequência mínima (a turbina 1 está à frequência máxima):
- a. O  $O_2$  encontra-se abaixo do set-point estabelecido.
    - i. Até à frequência de 50 Hz, vai aumentando gradualmente a velocidade de rotação da turbina 2. Quando atinge 50 Hz, ambas as turbinas estão em funcionamento à velocidade máxima até que o oxigénio seja superior que o set-point estabelecido.
  - b. O  $O_2$  encontra-se acima do set-point estabelecido. A frequência vai diminuindo gradualmente até ao mínimo de 23 Hz. No caso de à frequência mínima, o  $O_2$  continuar acima do set-point então:
    - i. Se estiver acima do  $O_2$  máx, a turbina 2 pará. O tempo volta ao zero.
    - ii. Se estiver abaixo do  $O_2$  máximo, ambas as turbinas permanecem em funcionamento. Retoma-se o tópico 3.
4. A turbina 2 está parada. Assim que o tempo atinge  $t_3$  então:
- a. Se o  $O_2$  for superior ao máximo então a turbina 1 para também.
  - b. Se o  $O_2$  estiver abaixo do máximo, é retomado o tópico 2.

Algoritmo com variador

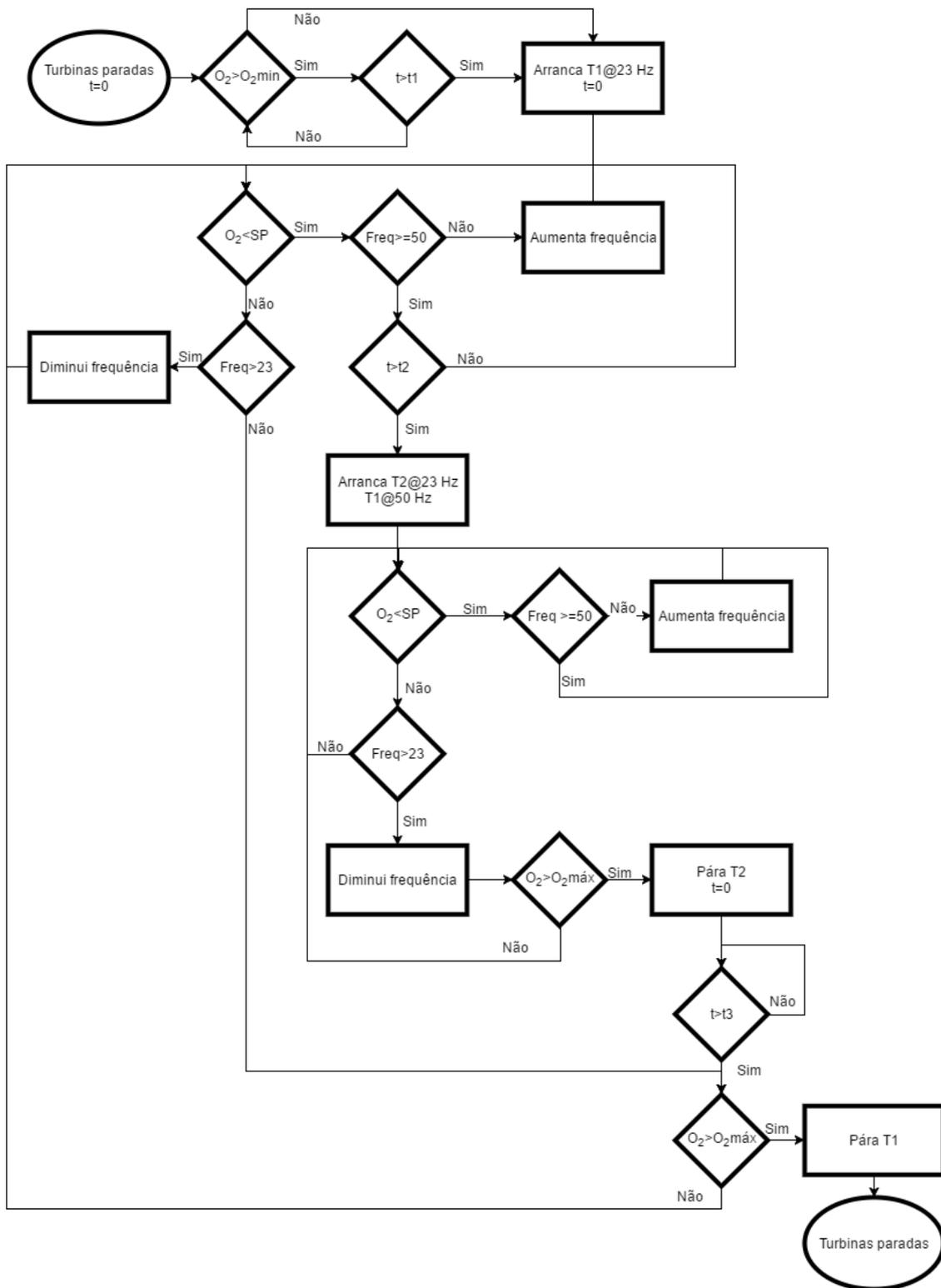


Figura 3 - algoritmo de funcionamento das turbinas com variador de velocidade