



Tratamento de Efluente Industrial Reator Descontínuo Sequencial (SBR)

RICARDO JOSÉ ALMEIDA DA CONCEIÇÃO

Outubro de 2022

Mestrado em Engenharia Química

Tratamento de Efluente Industrial – Reator Descontínuo Sequencial (SBR)

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de Dissertação/Estágio
do ramo de Energia e Biorrefinaria

Ricardo José Almeida Conceição



Departamento de Engenharia Química

Orientador no ISEP:

Doutora Paula Cristina Silva

Orientador na Empresa:

Eng.º Vitorino Matos Beleza

Eng.º Jorge João Abreu Faria

15/10/2022

Agradecimentos

Quero assim expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Eng.º Vitorino de Matos Beleza, um agradecimento muito especial por ter proposto este tema, pelos conselhos e orientações dados e por toda a disponibilidade manifestada e que contribuiu para que este trabalho decorresse sempre da melhor forma possível.

À Doutora Paula Cristina Silva, pela orientação neste trabalho, pelo incentivo e pela ajuda na elaboração deste relatório.

Ao Eng.º Jorge Faria, pelo apoio incondicional na realização deste trabalho, garantindo sempre os meios necessários à sua execução.

À minha esposa Susana, por todo o carinho, confiança e motivação ao longo deste período.

A todos, muito obrigado!

Resumo

No âmbito da disciplina de Dissertação/Estágio do ramo de Energia e Biorrefinaria do departamento de Engenharia Química, surgiu a oportunidade de estudar o método de tratamento biológico com um reator descontínuo sequencial (SBR) das águas residuais da empresa “Aquitex, S.A.”, com o objetivo da reutilização da parte dessa água e descarga da restante no coletor municipal.

Presentemente a empresa objeto deste estudo encontra-se a tratar o seu efluente externamente através de uma empresa licenciada, devido ao seu conteúdo químico perigoso. Para este efeito, no ano de 2020, a Aquitex adquiriu um sistema de pré-tratamento físico-químico, o qual não se mostrou capacitado para a prossecução do seu propósito.

Neste trabalho, procedeu-se, em primeiro lugar, à caracterização do efluente industrial da organização e otimização do tratamento físico-químico existente.

Para a realização do estudo, foram construídos dois reatores SBR piloto, os quais foram alimentados durante um período de 6 meses, numa primeira fase com o efluente tal e qual e o efluente proveniente do tratamento físico-químico e, numa segunda fase, apenas com o efluente que revelou melhores resultados obtidos na primeira fase – efluente com tratamento primário. Na segunda fase, a estabilização da temperatura mostrou ser um fator fundamental para o rendimento do SBR; aqui, foram obtidos valores de redução de CQO de 75%, de 82% na redução da CBO₅ e de 16% na redução da concentração de azoto. Este último parâmetro – baixa redução da concentração de azoto –, aliada à sua expressiva presença no efluente da Aquitex, criou a necessidade de complementar o referido tratamento com a construção de uma instalação piloto de macrófitas para fazer um polimento à água residual final.

O conjunto destes processos de tratamento permitiu, assim, atingir os valores máximos admissíveis para descarga do efluente tratado no coletor municipal, pelo que se procedeu ao seu dimensionamento para construção à escala real.

Foi proposto para o tratamento do efluente industrial um processo com 3 etapas, que terá como tratamento primário um processo físico-químico, o tratamento secundário onde será realizado um tratamento biológico, com um processo de lamas ativadas num SBR e, por fim, o tratamento terciário, durante o qual o efluente será tratado por um leito de macrófitas.

Palavras-chave: Efluente industrial, Tratamento físico-químico, SBR, leito de macrófitas

Abstract

In the scope of the Dissertation/Internship subject of the Energy and Biorefinery branch of the Chemical Engineering Master Degree, an opportunity arose to study a biological treatment method with a sequential batch reactor (SBR) for the wastewater of the company "Aquitex, S.A.", with the aim of reusing part of this water and discharging the remainder into the municipal collector.

At present, the company is treating its effluent externally through a licensed company, due to its hazardous chemical content. For this purpose, in 2020, Aquitex acquired a physical-chemical pre-treatment system, which did not prove capable of fulfilling its purpose.

In this work, the first step was to characterise the organisation's industrial effluent and optimise the existing physicochemical treatment.

To carry out the study, two pilot SBR reactors were built, which were fed for a period of 6 months, in a first phase with the effluent without any treatment and the effluent from the physico-chemical treatment and, in a second phase, only with the effluent that showed better results obtained in the first phase - effluent with primary treatment. In the second phase, the temperature stabilisation proved to be a fundamental factor for the performance of the SBR, where it was obtained a 75% reduction in COD, 82% reduction in BOD5 and 16% reduction in nitrogen concentration. At this stage the temperature stabilisation proved to be a fundamental factor for the performance of the SBR. This last parameter - low reduction in nitrogen concentration - combined with its significant presence in Aquitex's effluent, created the need to complement the aforementioned treatment with the construction of a macrophyte pilot plant to polish the final wastewater.

These treatment processes allowed to reach the maximum admissible values for the discharge of the treated effluent in the municipal collector.

A 3-stage process has been proposed for the treatment of the industrial effluent. The primary treatment will be a physicochemical process, the secondary treatment will be biological, using a process of activated sludge in a SBR and finally the tertiary treatment, where the effluent will be treated by a wetland process with macrophytes plants.

Key-words: Industrial effluent, Physico-chemical treatment, SBR, Constructed wetlands

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Apresentação da empresa.....	2
1.3. Contextualização e definição do problema.....	6
1.3.1. Caracterização do efluente	6
1.3.2. Processos de tratamento instalados	8
1.4. Valores limites de descarga	10
1.5. Objetivos.....	11
1.6. Organização do trabalho	12
2. Estado da Arte	14
2.1. Tratamento Biológico – Processo de Lamas Ativadas	14
2.1.1. Introdução.....	14
2.1.2. Descrição do processo	15
2.1.3. Microbiologia do processo	17
2.2. reatores Descontínuos Sequenciais (SBR)	20
2.2.1. Características do processo SBR.....	21
2.2.2. Ciclos SBR.....	23
2.3. Leito de Macrófitas.....	26
2.3.1. Descrição.....	26
2.3.2. Componentes.....	27
2.3.3. Sistema subsuperficial horizontal.....	28
3. Metodologia experimental.....	31
3.1. Caracterização do efluente industrial da Aquitex	31
3.2. Otimização do TFQ	31
3.3. Instalação experimental do SBR.....	34
3.4. Instalação experimental do leito de macrófitas.....	38
3.5. Controlo analítico	42
3.6. Cálculo da eficiência.....	43

4. Resultados.....	44
4.1. 1ª Fase – Determinar o melhor processo de tratamento	44
4.1.1. Recolha dos restos dos contentores/lavagem dos reatores.....	44
4.1.2. Otimização TFQ	45
4.1.3. SBR – Ensaios com o efluente.....	49
4.2. 2ª Fase – Estabilização do processo de tratamento com o SBR.....	51
4.3. Leito de macrófitas	56
5. Scale-Up	59
5.1. Tratamento proposto.....	59
5.2. Dimensionamento do tratamento físico-químico	59
5.3. Dimensionamento do SBR	60
5.3.1. Condições operacionais.....	61
5.3.2. Cálculo do volume do reator	62
5.3.3. Dimensionamento do arejamento.....	63
5.3.4. Produção de lamas.....	65
5.3.5. Volume de lamas sedimentadas a extrair	66
5.3.6. Leito de secagem de lamas.....	67
5.4. Dimensionamento do leito macrófitas.....	69
5.5. Resumo do processo de tratamento proposto e dos parâmetros de projeto	70
6. Conclusões.....	71
7. Referências	73
Anexos.....	75
Anexo A – Resultados das análises para a caracterização do efluente.....	76
Anexo B – Resultados das análises dos diferentes efluentes.....	77
Anexo C – Procedimento <i>Jar Test</i>	83
Anexo D – Resultados das análises aos SBR (2ªFase)	86
Anexo E – Resumo processo de tratamento	89
Anexo F – Recolha restos de produtos	91

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Organograma da estrutura interna da Aquitex, S.A.	3
Figura 1.2 – Diagrama do processo produtivo	4
Figura 1.3 – Variação de pH do efluente nos ensaios realizados entre junho e novembro de 2021	6
Figura 1.4 – Variação da CQO do efluente nos ensaios realizados entre junho e novembro de 2021	7
Figura 1.5 – Sistema de pré-tratamento físico-químico	8
Figura 1.6 – Descrição do projeto	13
Figura 2.1 – Representação esquemática do processo de lamas ativadas	15
Figura 2.2 – Esquema típico de floco da lama ativada	16
Figura 2.3 – Classificação dos microrganismos	17
Figura 2.4 – Fases do ciclo do SBR	21
Figura 2.5 – Número de ciclos SBR.....	23
Figura 2.6 – Sequência típica de um SBR para um ciclo de 6 horas, para águas domésticas	24
Figura 2.7 – Representação dos vários tipos de leitos de macrófitas	28
Figura 2.8 – Esquema leito macrófitas com fluxo subsuperficial horizontal	29
Figura 3.1 - Suspensão de cal	32
Figura 3.2– Teste de coagulação/floculação com equipamento <i>Jar Test</i>	33
Figura 3.3– Painel de controlo do TFQ	33
Figura 3.4 – Esquema de instalação do SBR piloto	34
Figura 3.5 – Vista frontal dos SBR	35
Figura 3.6 – Vista de cima dos SBR pilotos.....	35
Figura 3.7 – SBR na fase de arejamento	37
Figura 3.8 – SBR na fase de sedimentação	37
Figura 3.9 – Contentor de 1000 L.....	38
Figura 3.10 – Entrada e saída do efluente	38
Figura 3.11 – Leito de macrófitas em teste hidráulico	39
Figura 3.12 - Brita 31/56 mm	39
Figura 3.13 - Brita 14/20 mm	39
Figura 3.14 - Brita 4/10 mm	40
Figura 3.15 - Areia média 0/4 mm	40
Figura 3.16 – Plantação dos caniços no leito	40
Figura 3.17 – Zona de saída do leito	41
Figura 3.18 – Caniços em fase de desenvolvimento	41
Figura 3.19 – Medidor de pH	42
Figura 3.20 – Termoreator.....	43
Figura 3.21 - Espectrofotómetro.....	43
Figura 4.1 – Efeito da recolha dos restos de produtos nos valores da CQO nos ensaios realizados entre junho de 2021 e abril de 2022	45

Figura 4.2 – Redução da CQO e rendimento no TFQ nos ensaios realizados entre julho de 2021 e abril de 2022.....	46
Figura 4.3 – Rendimento CBO ₅ no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022	46
Figura 4.4 – Redução fósforo total no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022....	47
Figura 4.5 – Redução fósforo reativo no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022	47
Figura 4.6 – Redução da concentração do azoto total no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022	48
Figura 4.7 – Exemplo dos resultados obtidos no TFQ, em 23/11/2021 (esquerda), 24/11/2021 (direita).....	48
Figura 4.8 – Remoção da CQO no SBR1, com efluente tal e qual, nos ensaios realizados entre novembro e dezembro de 2021.....	49
Figura 4.9 – Remoção da CQO no SBR2, com efluente do TFQ, nos ensaios realizados entre novembro e dezembro de 2021.....	49
Figura 4.10 – Rendimento dos SBR sem aquecimento na remoção da CQO, nos ensaios realizados entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022.....	51
Figura 4.11 – Rendimento dos SBR com aquecimento, nos ensaios realizados entre janeiro e abril de 2022	52
Figura 4.12 – Rendimento do SBR1 na remoção da CQO, nos ensaios entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022.....	52
Figura 4.13 – Rendimento do SBR2 na remoção da CQO, nos ensaios entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022.....	53
Figura 4.14 – Rendimento SBR na redução da CQO ₅ , nos ensaios realizados entre janeiro e fevereiro de 2022	53
Figura 4.15 – Rendimento dos SBR na remoção da concentração de azoto, nos ensaios realizados entre janeiro e fevereiro de 2022.....	54
Figura 4.16 – Rendimento SBR2 na remoção do fósforo total	54
Figura 4.17 – Leito de macrófitas em abril/2022	56
Figura 4.18 – Leito de macrófitas em maio/2022.....	56
Figura 4.19 – Leito de macrófitas em junho/2022.....	57
Figura 4.20 – Leito de macrófitas em junho/2022.....	57
Figura 5.1 – Esquema tratamento proposto	59
Figura 5.2 – balanço de massa do SBR piloto.....	61
Figura 5.3 – Esquema do processo proposto	70

Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Valores limite de descarga no coletor municipal.....	10
Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do SBR em relação ao sistema convencional de lamas ativadas.....	20
Tabela 2.2 – Vantagem das zonas húmidas em comparação com os sistemas de tratamento de águas residuais convencionais	26
Tabela 3.1 – Plano de arranque dos SBR	36
Tabela 4.1 – Valores médios de CQO e rendimento nos SBR.....	50
Tabela 4.2 – Análise ao efluente do leito de macrófitas.....	58
Tabela 5.1 – Condições TFQ para produzir 6 m ³ de efluente	60
Tabela 5.2 – Condições operacionais	61
Tabela 5.3 – Parâmetros reator SBR	62
Tabela 5.4 – Critérios para dimensionamento das necessidades de oxigénio na fase de arejamento (processos biológicos).....	64
Tabela 5.5 – Necessidades de arejamento no SBR.....	64
Tabela 5.6 – Constantes cinéticas para bactérias heterotróficas a 20°C	66
Tabela 5.7 – Resumo dos parâmetros do leito de secagem	68
Tabela 5.8 – Estrutura do leito de secagem.....	68

Lista de abreviaturas

A/M - Razão alimento/microrganismos

AR – Águas residuais

ARI – Água residuais industriais

CBO₅ - Carência bioquímica de oxigénio ao fim de 5 dias

CQO - Carência química de oxigénio

ETAR - Estações de Tratamento de Águas Residuais

IBC - Recipiente de Capacidade Intermédia

ML – licor misto

MLVSS – Sólidos suspensos voláteis no licor misto

MO – Matéria orgânica

OD – Oxigénio dissolvido

SBR – Reator descontínuo sequencial (Sequencing Batch Reactor)

SST - Sólidos suspensos totais

SSV - Sólidos suspensos voláteis

TFQ – Tratamento Físico-Químico

TRH – Tempo de retenção hidráulico

TRS – Tempo de retenção de sólidos

VLE - Valor limite de emissão

VMA – Valor máximo admissível

1.Introdução

1.1. Enquadramento

O trabalho realizado foi proposto no âmbito da disciplina de Dissertação/Estágio do 2º ano do mestrado de Engenharia Química do ramo de Energia e Biorrefinaria do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), no ano letivo de 2021/2022, em parceria com a empresa AQUITEX – Acabamentos Químicos Têxteis, S.A., tendo como principal finalidade encontrar uma solução para o tratamento do seu efluente industrial e a sua implementação.

O tratamento e o destino final das águas residuais (AR) são um assunto de especial importância para a Aquitex, e neste contexto, a mesma adquiriu em 2020 um sistema de pré-tratamento com o propósito de tratar a água e dotá-la de características que permitissem a sua reutilização, por exemplo, para lavagens, a par da descarga do seu excesso no coletor municipal.

1.2. Apresentação da empresa

A AQUITEX, S.A. é uma empresa que se dedica à comercialização e fabrico de produtos químicos para a indústria têxtil e cerâmica, a laborar desde 1963 e com sede em Pedrouços, Maia.

Oferece uma vasta gama de produtos e soluções, dispondo de um laboratório têxtil e cerâmico e de uma elevada capacidade produtiva que, aliada a uma equipa profissional e dinâmica, propõe-se a encontrar as melhores soluções e a prestar um serviço de qualidade aos seus clientes.

Um dos compromissos da empresa, que vem ao encontro deste trabalho, é a promoção racional dos recursos naturais e a adequada gestão dos resíduos (privilegiando a sua valorização), tornando-se mais sustentável e amiga do ambiente e contribuindo assim para o bem comum.

A AQUITEX tem um edifício onde se localizam os escritórios e o laboratório e um armazém que se divide em 4 pavilhões, cada um com 900 m², sendo que a zona de produção têxtil compreende uma área de 450 m², a zona da produção cerâmica 225 m² e que a restante área se destina a armazenamento.

A figura 1.1 representa a estrutura interna da AQUITEX, tendo o presente trabalho sido realizado no Departamento de Manutenção.

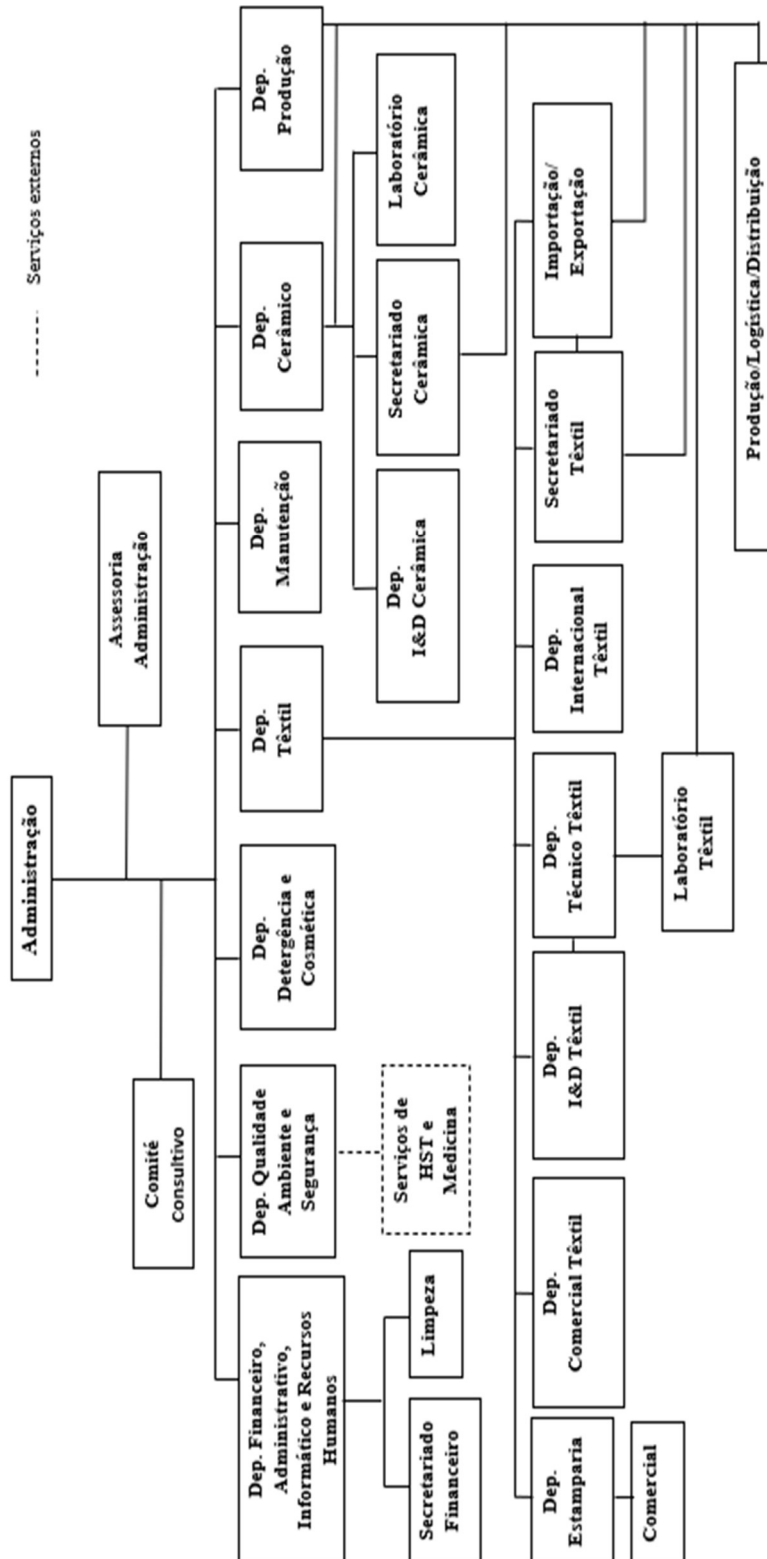


Figura 1.1 – Organograma da estrutura interna da Aquitex, S.A. (Adaptado de Manual de funções, Mod.001/AQ.0, 09-06-2022, rev. 12)

No que concerne especificamente à produção, indica-se que o setor têxtil dispõe de 9 reatores, com capacidades que variam entre os 500 kg e as 15 t, atingindo uma capacidade total de 52,5 t/d. Na cerâmica existem 5 diosnas (misturadores), que vão dos 10 aos 1000 kg, totalizando uma capacidade de 5 t/d.

Na figura 1.2, apresenta-se um diagrama do processo produtivo de ambos os setores; todas as produções são sempre realizadas por lote (processo descontínuo), proveniente de uma ordem de fabrico, que por sua vez tem origem numa encomenda de um cliente ou por motivo de reposição de stock.

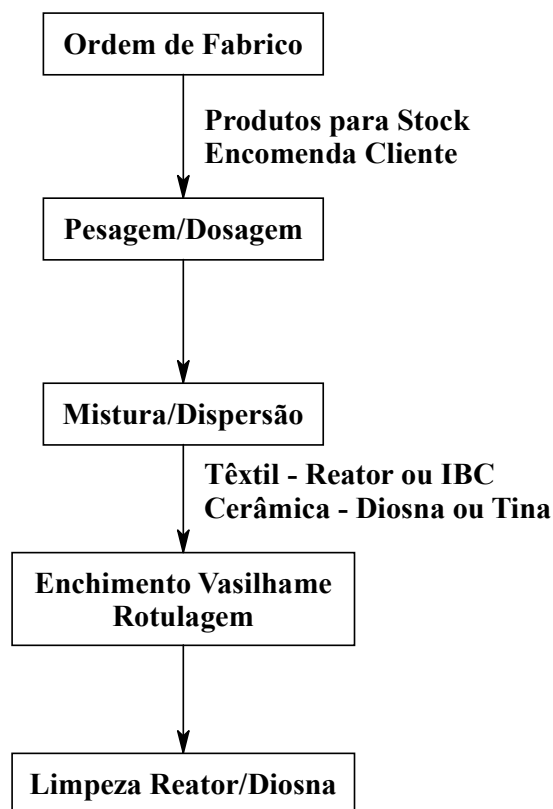


Figura 1.2 – Diagrama do processo produtivo

Os resíduos resultam de:

- atividade produtiva;
- lavagem de embalagens;
- atividade do laboratório.

No setor têxtil existem resíduos sólidos resultantes de embalagens de produtos em pó e resíduos líquidos que derivam da lavagem de reatores e da lavagem de contentores e bidões utilizados para o enchimento de produtos.

Na cerâmica, a maioria dos resíduos são de embalagens de produtos em pó e apenas uma pequena parte é líquida, proveniente da lavagem de bidões e tinas para o fabrico ou enchimento de produtos em papa.

Atualmente, todos os resíduos líquidos e sólidos são encaminhados para um operador certificado para a sua destruição.

O processo produtivo utiliza água desmineralizada, tratada através de um sistema de permuta iónica, que é alimentado por água da rede pública; a água desmineralizada é armazenada em 2 depósitos de 15 m³ e apresenta uma condutividade média de 5 µS/cm.

As águas de regeneração apresentam um carácter ácido e são encaminhadas para o tanque das águas residuais.

1.3. Contextualização e definição do problema

1.3.1. Caracterização do efluente

Como referido anteriormente, os resíduos líquidos resultam da lavagem de reatores, embalagens e da atividade do laboratório.

Dependendo do nível de produção e da quantidade de embalagens lavadas, são gerados 3 m³/d a 10m³/d de ARI, sendo a média 6 m³/d.

Foram controlados os valores de pH e da carência química de oxigénio (CQO).

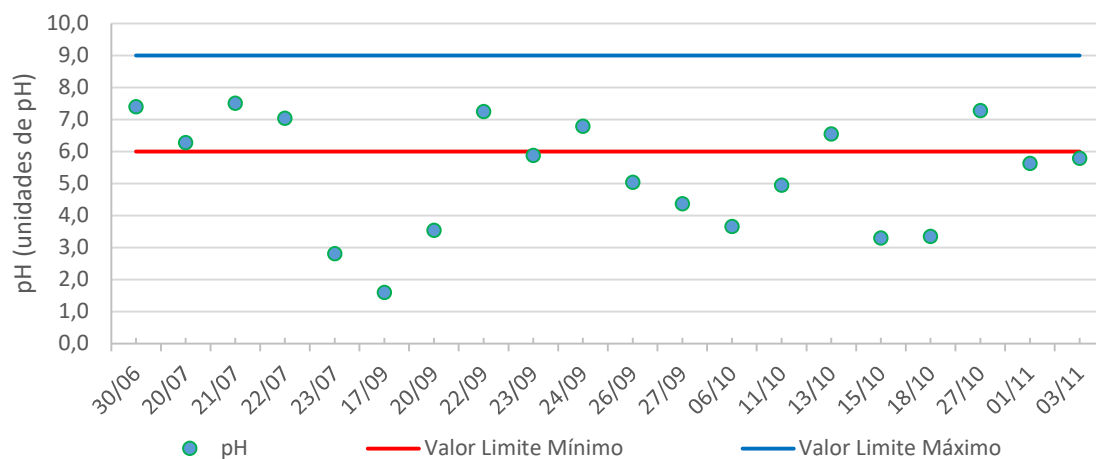


Figura 1.3 – Variação de pH do efluente nos ensaios realizados entre junho e novembro de 2021 (valores apresentados no anexo A)

O valor de pH para descarga autorizada no coletor municipal da Maia encontra-se entre 6 e 9.

Como é possível observar na figura 1.3, os valores de pH não são constantes, pois uma grande parte apresenta características ácidas, maioritariamente fora dos limites permitidos, consequência dos diferentes tipos de produtos preparados.

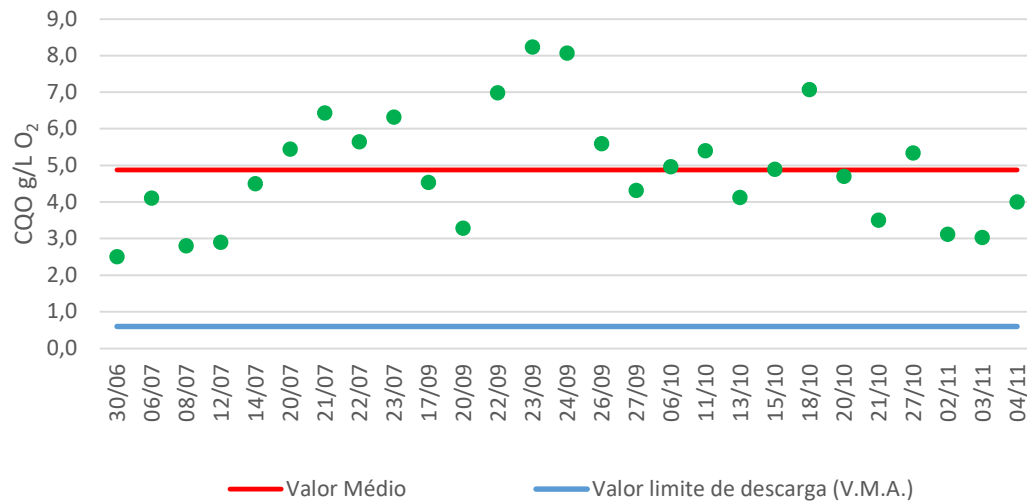


Figura 1.4 – Variação da CQO do efluente nos ensaios realizados entre junho e novembro de 2021 (valores apresentados no anexo A)

O mesmo acontece com os valores de CQO, que, observando a figura 1.4, têm uma variação entre os 2 e os 8 g/l O₂, com uma média de 5 g/l O₂, o que se afigura bastante elevado em comparação com o valor limite de descarga, que é de 0,6 g/l O₂.

1.3.2. Processos de tratamento instalados

Em setembro de 2020, a Aquitex instalou um sistema de pré-tratamento de águas residuais com o principal objetivo de tratar o efluente, reduzindo os parâmetros da água para valores aceitáveis para posterior descarga no coletor municipal.

Esse objetivo não foi alcançado, uma vez que o sistema não dispunha das características apropriadas para permitir a descarga do efluente tratado no coletor municipal. A unidade instalada consiste num sistema compacto de tratamento físico-químico (TFQ) de águas residuais, constituído por um tanque de homogeneização, uma unidade de coagulação/floculação/decantação, um filtro de carvão ativado, uma unidade de desidratação e um tanque de recolha da água tratada.

O tanque de homogeneização recebe todos os efluentes, tem uma capacidade de 8,5m³ e um sistema de recirculação que promove o arejamento do afluente através de um tubo de Venturi.

A unidade de coagulação/floculação/decantação, como se pode ver na figura 1.5, tem um reator de coagulação/floculação, com um volume de 100 L, que recebe o efluente do tanque de homogeneização, tendo agitação e sonda de pH onde são adicionados os neutralizadores, o coagulante e o floculante. Após passar pelo reator de floculação, o efluente segue para o decantador de lamelas de 400 litros.



Figura 1.5 – Sistema de pré-tratamento físico-químico

Esta unidade permite tratar um caudal máximo de 500 L/h; para ajuste do pH, era utilizada uma solução de soda cáustica e outra de ácido sulfúrico; como coagulante o policloreto de alumínio e como floculante uma poliacrilamida aniónica.

O clarificado sai do decantador, passa pelo filtro de carvão ativado e segue para o depósito de água tratada; as lamas são encaminhadas para as duas unidades de desidratação de lamas, cada uma com seis bolsas filtrantes.

1.4. Valores limites de descarga

Na tabela 1.1, apresentam-se os valores máximos admissíveis para a descarga de águas residuais industriais nos sistemas de recolha, drenagem e tratamento municipais da Maia.

Tabela 1.1 – Valores limite de descarga no coletor municipal

Parâmetros	Unidades	Valores limite de descarga (V.M.A.)*
pH	Unidades de pH	Entre 6 e 9
Temperatura	°C	< 25
CQO	mg/L O ₂	600
SST	mg/L	100
Relação CBO/CQO		> 0,3
Azoto total	mg/L N	60
Zinco	mg/L Zn	< 2
Crómio	mg/L Cr	< 2
Cobre	mg/L Cu	< 1
Chumbo	mg/L Pb	< 1

(*) V.M.A. – Valor máximo admissível para a descarga de águas residuais nos sistemas de recolha, drenagem e tratamento municipais. (Fonte: Serviços Municipalizados da Maia)

1.5. Objetivos

Tendo em vista a sustentabilidade, a Aquitex pretende tratar o seu efluente industrial, numa primeira fase para descarga no coletor municipal e numa posterior fase para reaproveitamento da água tratada em partes do processo industrial.

Como a instalação adquirida não cumpriu o seu objetivo, foi proposto um sistema de tratamento biológico com lamas ativadas para complementar o TFQ, e assim cumprir as condições para a descarga no coletor municipal.

O principal objetivo deste trabalho é estudar, à escala laboratorial, um processo biológico descontínuo e para tal utilizar um reator descontínuo sequencial, conhecido também por SBR – *Sequencing Batch Reactor* – e implementá-lo à escala industrial.

São igualmente propostas deste projeto:

- Caracterizar o efluente industrial e identificar problemas e implementar as melhorias para a homogeneização do efluente produzido;
- Otimizar o tratamento físico-químico;
- Reduzir a carga orgânica do efluente de alimentação do SBR;
- Complementar o tratamento do efluente com um leito de macrófitas para a redução, no efluente, da concentração de compostos azotados, com a construção de uma unidade piloto e posterior implementação à escala industrial.
- Propor e dimensionar um sistema de tratamento para o efluente industrial.

1.6. Organização do trabalho

O capítulo 1 pretende enquadrar o projeto, realizando-se uma abordagem inicial à empresa AQUITEX e evidenciando principalmente a sua estrutura organizativa, as principais atividades, o processo produtivo e os resíduos resultantes do mesmo. Segue-se a caracterização do efluente e a descrição do processo de tratamento instalado. Para concluir explana-se o enquadramento do estudo e define-se os objetivos do trabalho.

No capítulo 2, descreve-se o processo de tratamento de lamas ativadas e o funcionamento de um reator descontínuo sequencial, salientando as principais características das etapas do tratamento; releva-se uma breve referência ao sistema leito de macrófitas.

O capítulo 3 apresenta a metodologia seguida para o tratamento do efluente da empresa em análise, numa vertente qualitativa e processual, utilizando e otimizando o tratamento físico-químico e aplicando à escala piloto um reator descontínuo sequencial e um leito de macrófitas.

No capítulo 4 pretende-se mostrar os resultados obtidos em cada fase e o processo para o melhor tratamento do efluente.

No capítulo 5 apresenta-se dimensionamento do processo de tratamento à escala real.

Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.

O presente documento encontra-se organizado de acordo com a metodologia apresentada na figura 1.6.

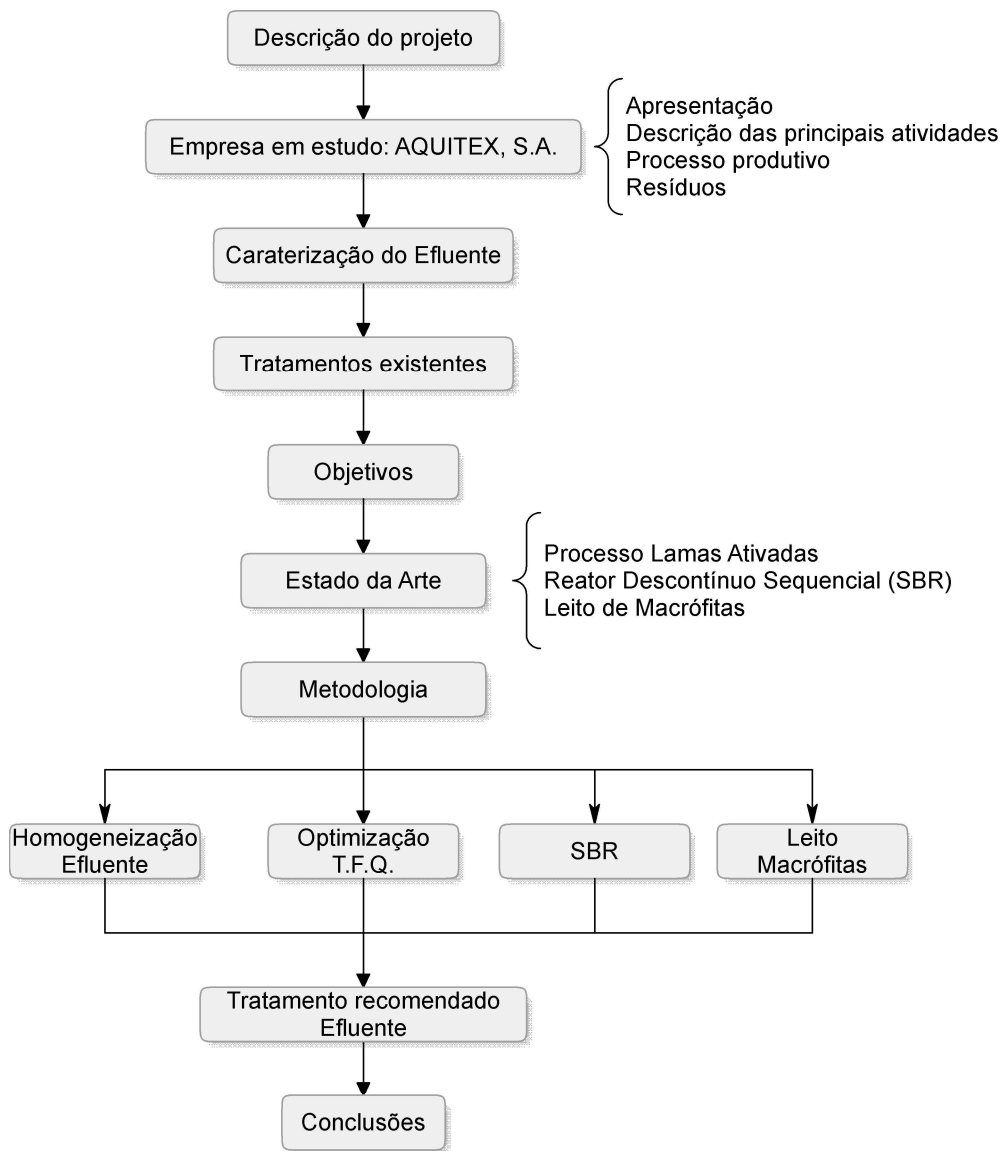


Figura 1.6 – Descrição do projeto

2.Estado da Arte

2.1. Tratamento Biológico – Processo de Lamas Ativadas

2.1.1. Introdução

O tratamento biológico de uma água residual pelo processo de lamas ativadas traduz-se na oxidação bioquímica da matéria orgânica dissolvida e em suspensão coloidal realizada por microrganismos aglomerados em flocos que formam a biomassa, a qual é mantida em suspensão através da agitação mecânica do reator. Este processo tem sido amplamente utilizado no tratamento de águas residuais urbanas e industriais, desde a primeira década do século XX, para estabilização da matéria orgânica biodegradável, que é quantificada pelo valor da carência bioquímica de oxigénio (CBO₅).

Segundo Metcalf & Eddy, 2016¹, os estudos concernentes a este método iniciaram-se ainda em 1880, com Dr. Angus Smith, o qual verificou a aceleração da oxidação da matéria orgânica através de um trabalho de tratamento de esgotos em tanques. As experiências foram evoluindo para a testagem da injeção forçada de ar no tanque de armazenamento e sua conseqüente redução do potencial de putrefação do efluente. Foram, posteriormente, criadas “estações experimentais” de tratamento de esgotos e os seus avanços permitiram atestar o papel fulcral das lamas nos resultados obtidos pelo arejamento, passando este método desenvolvido por Arden & Lockett a designar-se por lamas ativadas – produção de uma massa de microrganismos que é responsável pela estabilização aeróbica da matéria orgânica presente nos efluentes. Este mesmo autor classifica o processo de lamas ativadas como tratamento secundário, quando se pretende a redução da CBO₅, CQO e sólidos suspensos totais (SST), e/ou como tratamento terciário quando o objetivo é a redução de nutrientes como o azoto e o fósforo.

¹ Metcalf & Eddy, 2016, p. 673

2.1.2. Descrição do processo

O processo de lamas ativadas convencional, como mostra a figura 2.1, inicia-se com a alimentação das águas residuais ao tanque de arejamento, no qual são injetadas grandes quantidades de ar ou oxigénio puro, que irão fornecer o oxigénio necessário para os microrganismos aeróbios e manter as lamas em suspensão. Após um determinado período de tempo, o licor misto segue para um decantador secundário, onde se separa a biomassa do efluente tratado, por ação da gravidade. Por último, uma parte da biomassa volta a ser introduzida no tanque de arejamento, e a restante é eliminada do sistema. O método SBR é um sistema idêntico ao descrito, sendo as fases de arejamento e decantação realizados no mesmo reator.

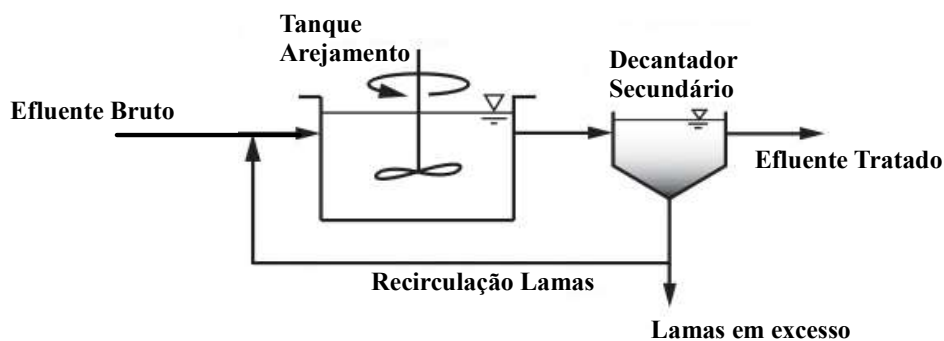


Figura 2.1 – Representação esquemática do processo de lamas ativadas (adaptada Metcalf & Eddy, 2016, p. 674)

O efluente que entra no tanque de arejamento é habitualmente submetido a um tratamento primário; já no tanque de arejamento, é promovido o desenvolvimento de bactérias aeróbias, as quais, juntamente com outros microrganismos (Protozoários, Fungos e Rotíferos), segregam uma matriz polissacarídea que os aglutina, promovendo a formação de flocos, ou lamas ativadas. Na figura 2.2 é representada uma estrutura típica de um floco de lama ativada.

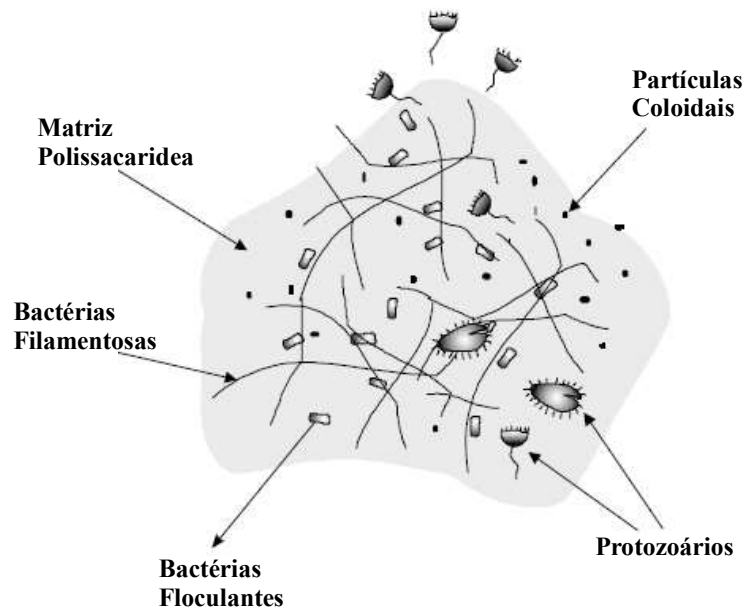
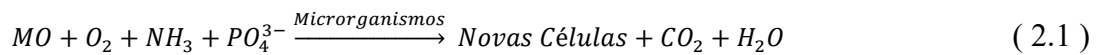


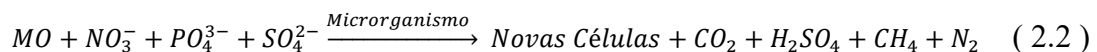
Figura 2.2 – Esquema típico de floculo da lama ativada
(Adaptada de Sperling, 2007, p.18)

Os microrganismos são utilizados para transformar a matéria orgânica (MO) por oxidação em produtos finais simples e biomassa adicional, como é representado na equação 2.1, para um processo aeróbio.



Onde O_2 , NH_3 e PO_4^{3-} são os nutrientes necessários para ocorrer a oxidação da matéria orgânica e as novas células representam a biomassa produzida.

No caso de um processo anaeróbio, a degradação da MO pode ser representada pela equação 2.2.



2.1.3. Microbiologia do processo

As águas residuais contêm muitos microrganismos, alguns patogénicos, que se tornam responsáveis pela sua depuração. De acordo com Metcalf & Eddy, 2016², é possível classificá-los em cinco grandes tipos – Bactérias, Protozoários, Algas, Fungos e Vírus; destes, as bactérias são os principais responsáveis pela depuração biológica, que deriva de uma sequência de reações redox, o que, a par da presença de um oxidante, decompõe a matéria orgânica. O oxidante pode ser o oxigénio dissolvido nas águas residuais – um aceitador de eletrões –, ou outros compostos caso este não exista.

Como se pode observar na figura 2.3, os microrganismos necessitam de metabolizar compostos de carbono; dependendo de a fonte de carbono ser constituída por compostos orgânicos ou inorgânicos, podem respetivamente ser classificados como heterotróficos ou autotróficos. Os primeiros podem ser aeróbios, anaeróbios ou facultativos. Os segundos podem ser fotossintéticos – utilizam a luz solar como fonte de energia – ou quimiossintéticos – obtêm a energia necessária aos seus processos metabólicos através da oxidação bioquímica de compostos.

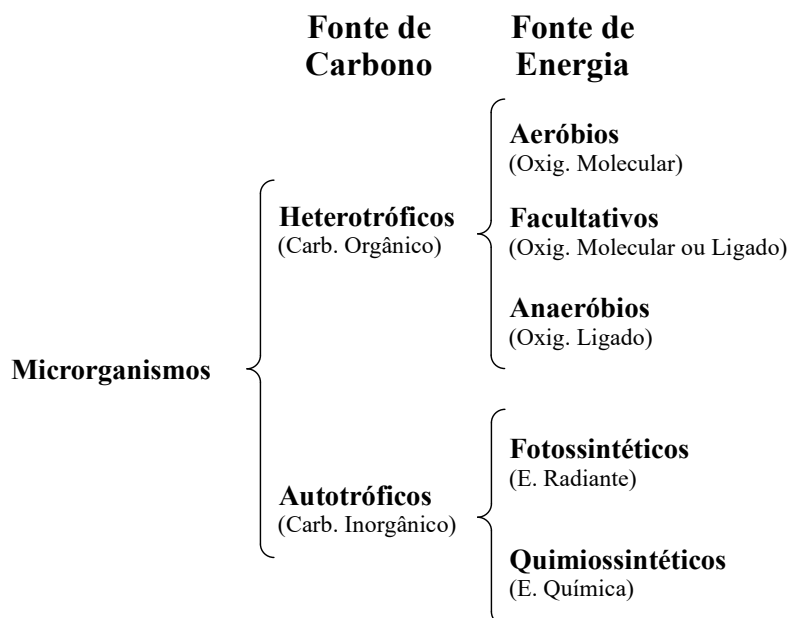


Figura 2.3 – Classificação dos microrganismos (Adaptado de Beleza & Teixeira, 1999)

² Metcalf & Eddy, 2016, p. 543

Os microrganismos heterotróficos podem ser classificados quanto à necessidade de oxigénio dissolvido na água em:

- Aeróbios – dependem da presença de O_2 , que atua como aceitador final de eletrões;
- Anaeróbios – não necessitam de O_2 ; utilizam compostos inorgânicos como aceitador de eletrões – CO_2 ; SO_4^{2-} ; NO_3^- - reduzindo-os a metano (CH_4); sulfuretos (S^{2-}); Amoníaco (NH_3);
- Facultativos – não necessitam do O_2 , mas na sua presença desenvolvem-se melhor. Encontram-se em ambientes anóxicos, caracterizados pela ausência de O_2 , mas pela presença de oxigénio combinado – SO_4^{2-} ; NO_3^- . Na desnitrificação, por exemplo o nitrato atua como aceitador de eletrões.

Existem microrganismos estritamente aeróbios que não sobrevivem na ausência de oxigénio dissolvido na água, ou estritamente anaeróbios que não sobrevivem na presença de oxigénio dissolvido.

Para além da fonte de carbono e de um oxidante, a atividade microbiana é afetada pela temperatura e pH do meio, fatores que condicionam a velocidade de todas as reações químicas/bioquímicas.

Quanto à temperatura ótima para crescimento, os microrganismos podem ser classificados como psicrófilos – 12°C a 18°C; mesófilos – 25°C a 40°C; termófilos – 55°C a 65°C.

O pH é também um fator relevante no crescimento dos microrganismos: o seu intervalo ideal é entre 6 e 8, no qual a oxidação se processa com maior velocidade. A maioria das bactérias não tolera valores de pH superiores a 9,5 ou inferiores a 4. (Marconi, 2001)

Os microrganismos heterotróficos desempenham um papel fundamental na remoção da matéria orgânica biodegradável; o seu metabolismo é composto por duas fases, uma em que o conjunto de reações bioquímicas transforma a matéria viva em produtos residuais, chamado catabolismo, e outro que corresponde às reações bioquímicas que conduzem ao crescimento e reprodução dos microrganismos, anabolismo.

Como referido anteriormente, no tratamento de águas residuais é possível ter vários tipos de microrganismos, pelo que se segue uma breve descrição da cada um:

Bactérias

As bactérias são microrganismos importante nas águas residuais, por serem responsáveis pela decomposição da matéria orgânica do efluente. São caracterizadas por serem unicelulares, procariontes e consumidoras de nutrientes solúveis. Existe um grande número de espécies de bactérias com tamanhos e formas diferentes, sendo as principais a esférica, cilíndrica, helicoidal e filamentosa. As espécies predominantes vão depender das características do efluente e das condições do meio.

Protozoários

Os protozoários são um importante instrumento de diagnóstico e avaliação do desempenho das estações de tratamento. São seres unicelulares e geralmente móveis, um grupo muito diversificado de organismos, em tamanho, formas e organizações. Vivem apenas em condições aeróbias e quando existe pouca matéria orgânica biodegradável tornam-se predominantes. Estes microrganismos têm um papel fundamental no tratamento biológico, uma vez que se alimentam de bactérias livres, reduzindo a turbidez do efluente.

Rotíferos

Os rotíferos são microrganismos multicelulares, de maiores dimensões, alimentam-se de bactérias, protozoários e detritos orgânicos, e desta maneira ajudam a limpar o efluente reduzindo a sua turbidez; têm tempos de gestação elevados, sendo por isso característicos de lamas com idades mais avançadas, sendo a sua presença indicadora de boa eficiência do sistema.

2.2. Reatores Descontínuos Sequenciais (SBR)

Os Reatores Descontínuos Sequenciais são utilizados no tratamento de águas residuais municipais e industriais há mais de cem anos, em todo o mundo.

São especialmente recomendados em situações de baixos caudais ou com fluxos variáveis de efluentes e onde a falta de espaço é um problema, o tratamento é realizado num só tanque, sem a necessidade de um clarificador independente, o que os torna processos muito versáteis no tratamento de águas residuais.

O desenvolvimento tecnológico, especialmente no que concerne aos equipamentos de arejamento e sistemas de controlo informático, foi um fator decisivo na evolução e controlo dos processos, tornando-os cada vez mais eficientes, em detrimento do sistema convencional de lamas ativadas.

Segue-se a tabela 2.1, adaptada de Gerardi, 2010³, na qual é possível observar uma pequena comparação do SBR – vantagens e desvantagens – por oposição ao tratamento de lamas ativadas convencional.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do SBR em relação ao sistema convencional de lamas ativadas

Vantagens
Menor espaço de implementação
Eliminação da necessidade de clarificador secundário e de bombas de retorno de lamas
Operação flexível e adaptável
Redução de mão-de-obra pelo elevado grau de automação
Redução do número de equipamentos
Inexistência de picos de caudal

³ Gerardi, 2010, p. 9

Tabela 2.1. – Vantagens e desvantagens do SBR em relação ao sistema convencional de lamas ativadas (*continuação*)

Desvantagens
Paragens/Arranques frequentes
Necessidade de operadores especializados, sobretudo no que diz respeito ao ajuste dos tempos de fases e ciclos.
Maiores custos de manutenção devido aos controlos automáticos
Possível necessidade de 2 ou mais tanques para o mesmo efeito

2.2.1. Características do processo SBR

O SBR é um processo de lamas ativadas que difere do processo normal por ser realizado num só tanque e em modo descontínuo – por ciclos. Comparativamente, um processo convencional de lamas ativadas necessita de vários tanques e funciona de modo contínuo, sendo necessário um decantador a jusante do reator biológico, para que se consiga valores de MO compatíveis para descarga no meio recetor.

Como observado na figura 2.4, um ciclo do SBR é constituído por cinco fases – enchimento; reação; sedimentação; extração e repouso.

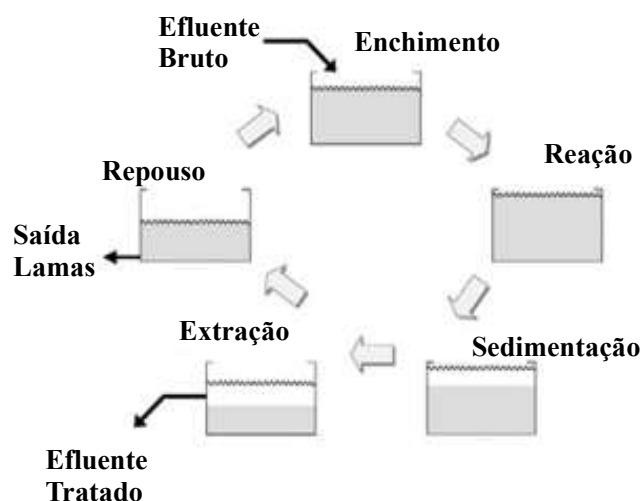


Figura 2.4 – Fases do ciclo do SBR (adaptada de Poltak, 2005, p.4)

Fazendo uma breve descrição: na fase de enchimento, o reator recebe o efluente que vai ser tratado, o qual contém o alimento para os microrganismos das lamas ativadas. Esta fase pode ser feita de três modos diferentes: o primeiro consiste num enchimento estático, isto é, o efluente é adicionado sem que se promova a mistura e arejamento, aplicando-se quando não há necessidade de nitrificação e desnitrificação e afigurando-se como economicamente mais vantajoso. O segundo modo é o enchimento misto, em que a entrada do efluente é realizada com mistura mecânica e sem arejamento, criando condições anóxicas, que promovem a desnitrificação. Por último, existe o enchimento com arejamento, em que a entrada do efluente é realizada com arejamento e mistura mecânica; nos casos em que o arejamento promove a dita mistura, pode-se dispensar os misturadores, uma vez que, desta forma, deixam de existir zonas anóxicas e anaeróbicas dentro do reator, passando a haver zonas aeróbicas onde se promove a nitrificação e a redução da carga orgânica.

Na fase da reação, não entra no tanque qualquer efluente e o arejamento (assim como a mistura mecânica, caso se aplique) está ligado. É neste estágio que se alcança a maior redução dos parâmetros das águas residuais.

Segue-se a fase de sedimentação, em que se desliga o arejamento, agitação mecânica ou qualquer tipo de fluxo, sendo neste momento que se separam as lamas do efluente tratado. Esta fase é crucial para o ciclo porque, caso as lamas não sedimentem rapidamente, serão extraídas na fase seguinte, degradando a qualidade do efluente.

Com a separação feita, segue-se a fase de extração, na qual é removido o sobrenadante clarificado do efluente. Durante esta fase é importante garantir que o volume decantado seja igual ao volume de enchimento e que a saída do efluente não interfira com os sólidos sedimentados, nem crie um vortex que provoque o seu levantamento.

Por último, a fase de repouso ocorre entre a fase de decantação e enchimento. A sua duração varia, consoante a quantidade de afluente gerado e a estratégia de operação. É também nesta fase, e sempre que necessário, que se procede à remoção de excesso de lamas ativadas.

Não existe um procedimento padrão e normalizado para o ciclo do SBR, podendo ser ajustados a cada situação os tempos e condições necessários em cada fase para se atingir uma maior eficiência do processo.

2.2.2. Ciclos SBR

O número de ciclos e o tempo das fases de cada ciclo num Reator Descontínuo Sequencial dependem de:

- Quantidade de águas residuais/caudal a tratar;
- Características e concentração da água;
- Requisitos de tratamento;
- Número de reatores disponíveis

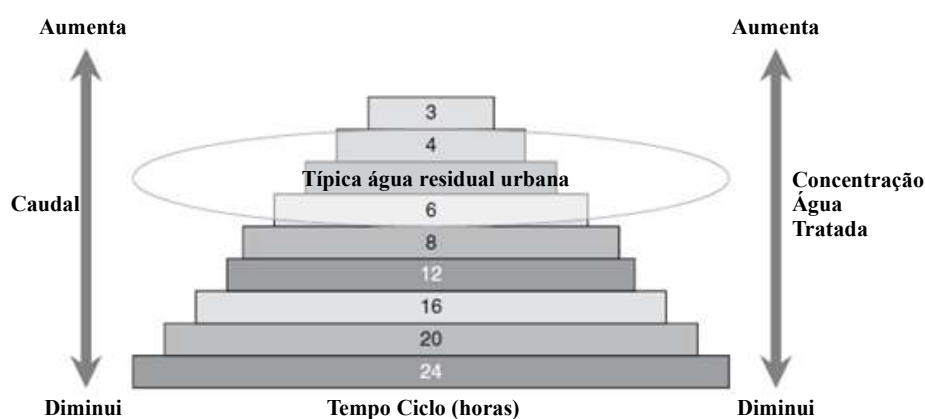


Figura 2.5 – Número de ciclos SBR (adaptado de Gerardi, 2010, p.12)

Como observado na figura 2.5, o número de ciclos e tempos de fases num SBR é determinado pela quantidade de água residual ou caudal a ser tratado, da carga/concentração da água, do número de reatores disponíveis em paralelo e dos requisitos de tratamento. Com estes pressupostos, um aumento do caudal resulta no aumento do número de ciclos por dia, logo uma diminuição do tempo de ciclos.

O mesmo acontece quando a concentração na água aumenta, mas, neste caso e para garantir os requisitos de tratamento, é necessário aumentar o seu tempo, logo diminuindo o número de ciclos por dia – é preciso garantir o número ideal de reatores para cumprir os requisitos de tratamento.

Quando existe um sistema de dois reatores a operar com o mesmo ciclo é importante - por questões operacionais - que trabalhem desfasadamente, isto é, o tempo que um reator necessita para fazer a reação, sedimentação e extração deve ser igual ao tempo de

enchimento do outro, garantindo-se assim que não existem interrupções no processo de tratamento.

Os tempos de cada fase do ciclo podem, assim, variar muito, não existindo uma fórmula específica para todas as águas residuais; na figura 2.6 é possível observar um exemplo de um ciclo aplicado a águas residuais domésticas.

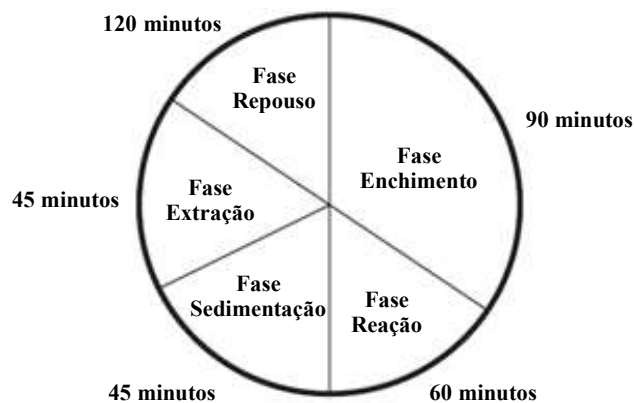


Figura 2.6 – Sequência típica de um SBR para um ciclo de 6 horas, para águas domésticas. (adaptado de Gerardi, 2010, p.13)

O tempo das fases por ciclo pode variar consoante o número de reatores, o caudal de águas residuais e da sua CBO_5 . A figura 2.6 é um exemplo de um ciclo típico de 6 horas, com 90 minutos para a fase de enchimento, 60 minutos para a fase de reação, 45 minutos para a fase de sedimentação, 45 minutos para a fase de extração e 120 minutos para de repouso. (Gerardi, 2010, p.13)

A duração da fase de enchimento pode variar entre 25% a 50% do tempo de ciclo, durante esta fase do ciclo e de acordo com o objetivo final, pode-se ter um enchimento estático que promove um período anaeróbio, um enchimento com mistura que promove um período anóxico ou um enchimento com arejamento que promove um período aeróbio.

Na fase de reação, o tempo pode variar entre 15 a 20% do tempo total, na fase de sedimentação entre 15 a 25% e na fase de decantação entre 5 a 50%. Um maior tempo na fase de sedimentação e decantação significa que existem problemas no ciclo de

tratamento (deficitária sedimentação dos sólidos ou perda de sólidos do manto de lamas). (Gerardi, 2010, p.11)

Um dos fatores ambientais que pode afetar o número de ciclos por dia e a duração das fases de ciclo é a baixa temperatura. Esta tem um grande impacto no tratamento de águas residuais, uma vez que afeta negativamente a atividade das bactérias no SBR, baixando drasticamente o seu rendimento. Estas condições promovem a formação de espuma, o que contribui para o crescimento de organismos filamentosos.

À medida que a temperatura sobe, a atividade biológica aumenta até que as enzimas sejam danificadas e a eficácia do tratamento se perca. Se a temperatura desce, a atividade enzimática diminui até que as enzimas sejam inibidas e a eficácia do tratamento seja novamente perdida. Normalmente, um aumento de 10°C duplica a taxa de atividade enzimática. (Gerardi, 2010, p.13)

Segundo Gerardi, 2010⁴, a temperatura ideal para o funcionamento do SBR é entre 20°C a 25°C. Quando se registam temperaturas inferiores a 16°C, devem ser tomadas medidas para manter o rendimento do tratamento, nomeadamente:

- Aumentar os sólidos suspensos voláteis no licor misto (MLVSS);
- Aumentar o tempo de reação nas etapas de operação do reator;
- Instalar reatores adicionais;
- Aumentar a concentração de oxigénio dissolvido, se possível;
- Aumentar a temperatura do efluente, se for possível.

⁴ Gerardi, 2010, p.14

2.3. Leito de Macrófitas

2.3.1. Descrição

A tecnologia do leito de macrófitas, também conhecido por “Wetlands”, é um sistema de tratamento de águas residuais que reproduz os múltiplos processos naturais de eliminação de poluentes, que ocorre em zonas permanentemente alagadas ou húmidas.

Estes sistemas são construídos com o objetivo de tratar vários tipos de águas residuais, podendo ter múltiplas formas e arranjos, assim como diferentes meios filtrantes e plantas.

Estes sistemas afiguram-se como uma alternativa viável, particularmente pelo baixo custo de construção e manutenção; apresentam-se também como uma solução mais sustentável e esteticamente apelativa.

Adaptando de Haberl et al (1999), a tabela 2.2 evidencia as principais vantagens das zonas húmidas construídas face aos sistemas de tratamento de águas residuais convencionais.

Tabela 2.2 – Vantagem das zonas húmidas em comparação com os sistemas de tratamento de águas residuais convencionais

Vantagens
Construção/operação/manutenção simples
Baixo consumo energético
Aumento da biodiversidade
Recriação de processos naturais
Fiabilidade do processo

2.3.2. Componentes

O leito de macrófitas é constituído por um tanque devidamente dimensionado, contendo, no seu interior água, um substrato e quase sempre plantas vasculares, na qual a comunidade de micróbios e invertebrados aquáticos se desenvolve naturalmente.

Explicitando:

Água

As condições que caracterizam as zonas alagadas naturais devem ser replicadas nas construções artificiais, no que toca ao escoamento e impermeabilização das bacias.

Substrato

Habitualmente, utiliza-se como substrato na construção dos leitos terra, areia, brita, rochas e materiais orgânicos; a este é atribuída relevância na medida em que serve de suporte às plantas macrófitas e a muitos organismos que aí habitam; a permeabilidade do substrato afeta o movimento da água através da zona húmida e é local de muitas transformações químicas e biológicas; permite ainda o armazenamento de muitos contaminantes, dado que funciona como filtro.

Plantas

As plantas macrófitas dominantes em zonas húmidas naturais são as do tipo emergentes, que se caracterizam pela fixação ao substrato, utilização em solos permanentemente alagados e que, em geral, são perenes.

Destas, as mais comuns na Europa – e em Portugal – são os caniços (*Phragmites australis*). No seu pico de crescimento (verão), podem atingir alturas superiores a 2 metros.

Quanto ao tipo de escoamento, é possível dividir o leito de macrófitas em dois, um com sistema de águas com superfície livre e o outro com sistema de fluxo subsuperficial, em que o fluxo é realizado através de um leito poroso, mantendo-se

sempre abaixo da superfície. O sistema subsuperficial pode ainda ser classificado em função do movimento da água, como horizontal ou vertical. Na figura 2.7 representam-se os vários tipos de macrófitas.

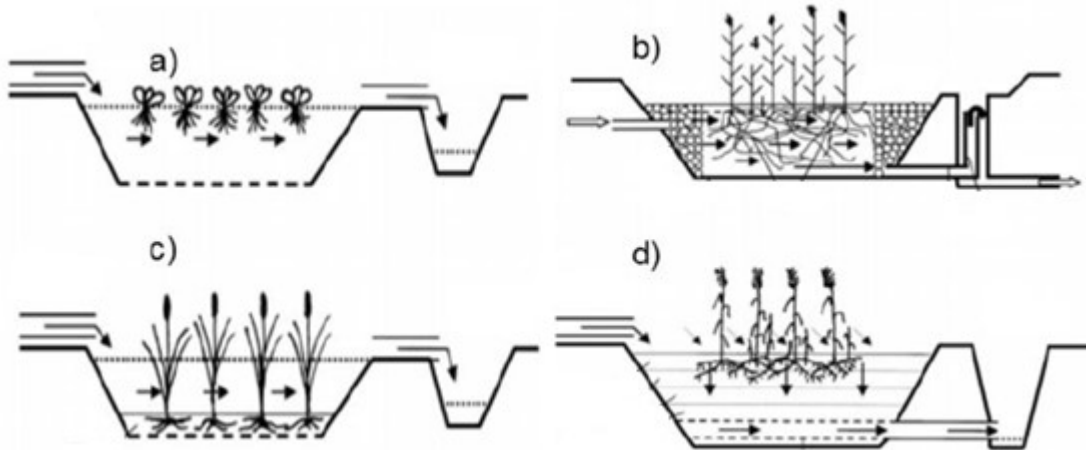


Figura 2.7 – Representação dos vários tipos de leitos de macrófitas: a) Sistema com macrófitas flutuantes; b) Sistema com macrófitas emergentes e fluxo subsuperficial horizontal; c) Sistema com macrófitas emergentes e fluxo superficial; d) Sistema com macrófitas emergentes e fluxo subsuperficial vertical (Vymazal, 2007, p. 50)

Neste trabalho será dada mais atenção ao sistema subsuperficial horizontal, o desenvolvido no âmbito do trabalho.

2.3.3. Sistema subsuperficial horizontal

Segundo Sperling, 2017⁵, o leito de macrófitas de escoamento horizontal foi desenvolvido na Alemanha nos anos de 1960. O escoamento horizontal é normalmente utilizado como tratamento secundário e terciário no tratamento de AR domésticas, bem como para uma variedade de efluentes industriais.

⁵ Sperling, 2017, p.45

Muitos países da Europa adotaram-no como tratamento secundário de efluentes domésticos, sendo, nestes casos, precedido de um tanque séptico como tratamento primário. No caso de ser utilizado como tratamento terciário, este é precedido normalmente por um tratamento biológico sendo realizado no leito horizontal uma etapa de polimento.

Este sistema é fácil de construir e operar; aqui, o efluente é descarregado numa das extremidades, deslocando-se horizontalmente através do meio poroso e da rizosfera, como observado na figura 2.8. Com este sistema, minimiza-se as condições propícias à formação de mosquitos. Também apresenta baixas taxas de transferência de oxigénio, predominando no seu interior processos anaeróbios que degradam a matéria orgânica.

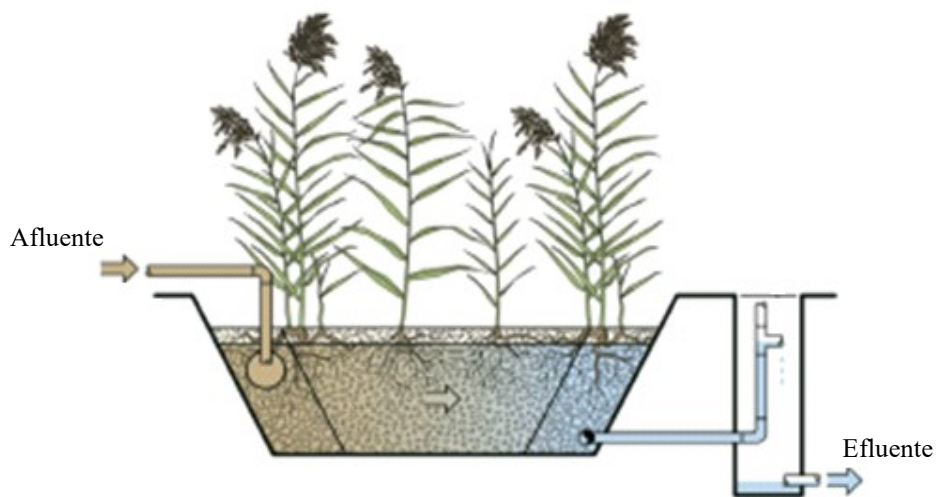


Figura 2.8 – Esquema leito macrófitas com fluxo subsuperficial horizontal (Sperling, 2017, p.46)

3. Metodologia experimental

Para a execução do trabalho e avaliação do desempenho do reator SBR, começou-se por elaborar a caracterização do efluente industrial e otimizar o tratamento físico-químico existente.

Seguiu-se a construção dos reatores pilotos e o seu arranque, para de seguida se dar início aos ensaios no SBR1 com o efluente tal e qual e no SBR2 com o efluente após tratamento físico-químico.

3.1. Caracterização do efluente industrial da Aquitex

Antes de se iniciar os ensaios com os SBR, afigurou-se importante fazer a caracterização do efluente industrial. Foram efetuadas recolhas representativas do efluente industrial e analisados internamente os valores de pH e CQO, a par de algumas análises externas, realizadas no Centro de Estudos de Águas do ISEP, nomeadamente à CQO, CBO, azoto e fósforo.

3.2. Otimização do TFQ

Antes do arranque do TFQ, foram efetuadas algumas alterações com o intuito de melhorar o funcionamento do equipamento, como se descreve a seguir:

O policloreto de alumínio foi substituído por cloreto férrico 40% (m/m) - esta alteração foi realizada por este ser um dos coagulantes mais utilizados na clarificação de águas residuais, uma vez que atua num amplo intervalo de pH, entre 3,5 e 8,5, e ser bastante eficientes na remoção de sólidos suspensos e fósforo do efluente. Na prática, este procedimento traduziu-se em remover a solução do policloreto do recipiente de armazenamento, lavar muito bem e preparar uma solução a 10% de cloreto férrico 40% (m/m).

A soda cáustica, não sendo é o melhor produto para neutralizar um efluente quando este vai ser submetido a um processo de coagulação, foi alterada para cal hidratada, que é uma base e é igualmente considerada coagulante. Para além do acerto do pH, auxilia na redução dos sólidos suspensos, na turbidez e na concentração de metais pesados e na precipitação de fosfato. Para esta substituição, foi necessário um recipiente e ar comprimido para manter a suspensão de cal, como se visualiza na figura 3.1: foi utilizada

a mesma bomba doseadora, o que requeria uma limpeza sempre que se desligasse o equipamento, para que não ficasse obstruída.

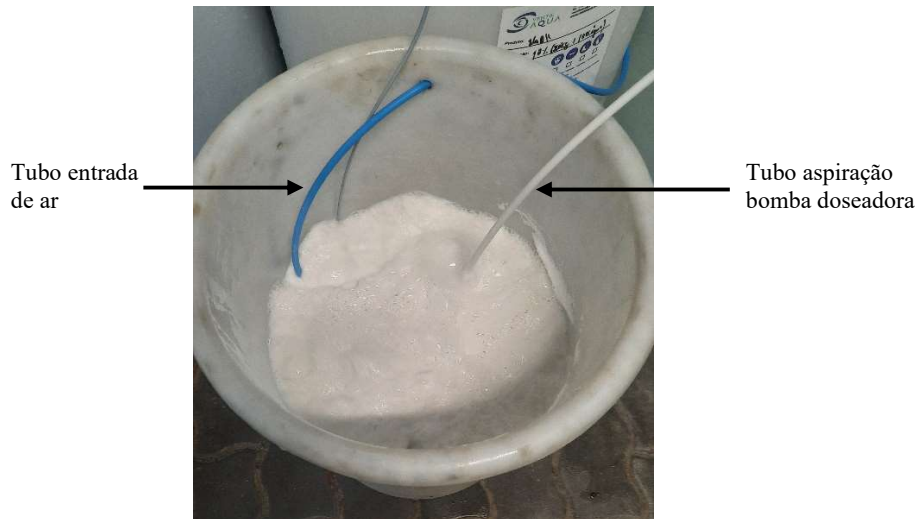


Figura 3.1 - Suspensão de cal

A alimentação do TFQ foi realizada a partir do tanque de homogeneização. Atualmente existe um tanque que recebe todas as águas residuais da atividade industrial. Para o TFQ trabalhar de forma eficiente são necessários 2 tanques. Enquanto o tanque 1 alimenta o TFQ, o tanque 2 recebe as águas residuais. Desta forma é possível garantir a melhor eficiência para o TFQ. Assim consegue-se garantir que o efluente no tanque 1 é sempre o mesmo ao longo do tempo de alimentação. Terminado o efluente do tanque 1, altera-se a alimentação do TFQ para o tanque 2. Enquanto o tanque 2 alimenta o TFQ, o tanque 1 recebe o efluente industrial. Para determinar as quantidades de coagulante e floculante a dosear, foram realizados ensaios de *Jar Test* (procedimento apresentado no anexo C) antes do arranque do TFQ, como se pode ver na figura 3.2.



Figura 3.2– Teste de coagulação/floculação com equipamento *Jar Test*

Dados operacionais do TFQ

Período de funcionamento: 8h – 17h (Corresponde a 9 horas em funcionamento)

Caudal de entrada do efluente: 0,35 m³/h

Ajuste pH entre 7,2 – 7,8

Na figura 3.3, apresenta-se o *layout* do painel de controlo do TFQ; este permite controlar os caudais de entrada, o ajuste de pH, controlar níveis dos depósitos, abrir e fechar válvulas e visualizar e gerir alertas de sistema.

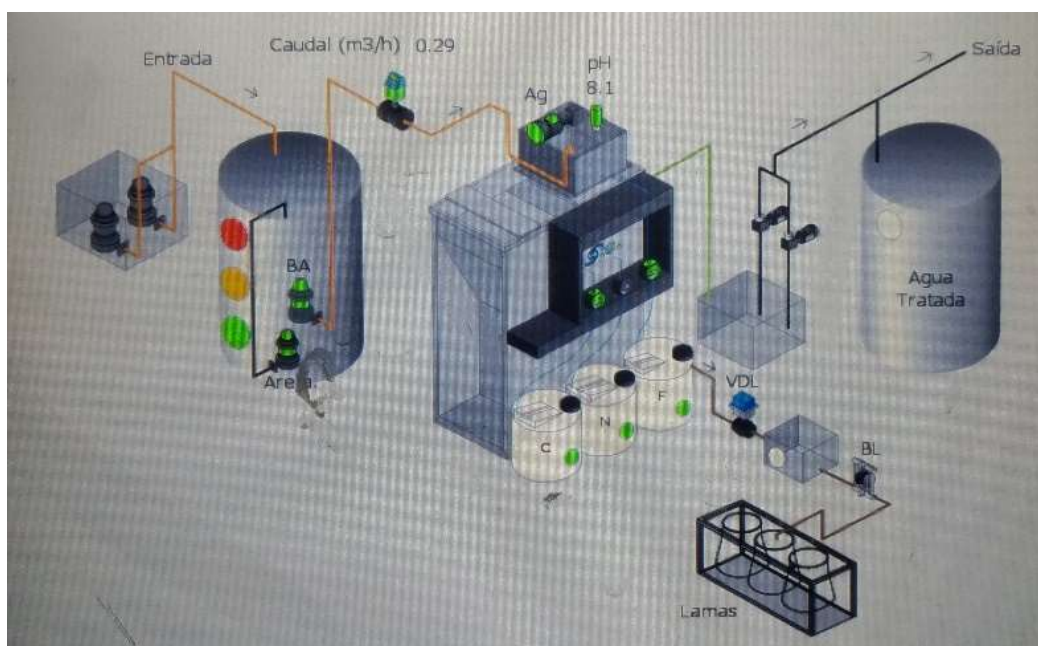


Figura 3.3– Painel de controlo do TFQ

3.3. Instalação experimental do SBR

Para avaliar o desempenho dos reatores SBR com os dois efluentes, um com o efluente tal e qual e outro com o efluente do TFQ, foram construídos e instalados na empresa Aquitex dois reatores piloto iguais. Para isso, foram utilizados dois recipientes cilíndricos de 10 litros, com 235 mm de diâmetro e 235 mm de altura, dois compressores de ar de aquário da marca EHEIM, modelo air 400, quatro difusores e quatro válvulas.

A válvula de descarga da lama foi colocada no fundo do recipiente para que permitisse remover as lamas em excesso e a válvula de descarga do efluente clarificado foi colocada a 60% da capacidade útil do reator para que permitisse remover o máximo de 40% do efluente. Na figura 3.4 apresenta-se o esquema para a construção dos pilotos.

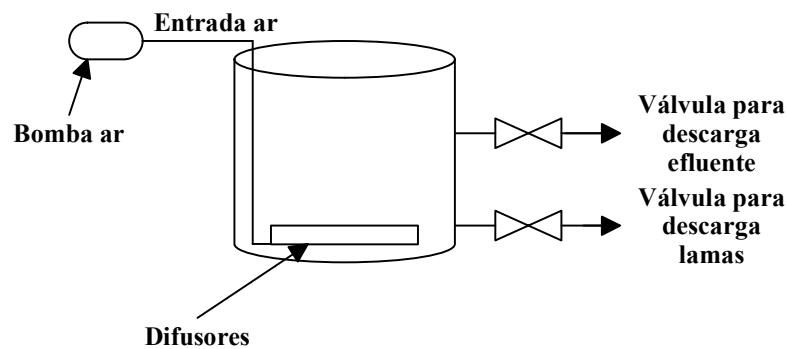


Figura 3.4 – Esquema de instalação do SBR piloto

Depois de reunidos todos os materiais necessários, construíram-se os reatores, os quais foram inicialmente testados com água para verificar a existência de fugas. Nas figuras 3.5 e 3.6, é possível visualizar a instalação dos SBR piloto.



Figura 3.5 – Vista frontal dos SBR



Figura 3.6 – Vista de cima dos SBR pilotos

Os reatores trabalharam com um volume de 8 litros, sendo tratados 3 litros por ciclo. O SBR1 foi alimentado com o efluente tal e qual e o SBR2 com o efluente proveniente do TQF.

Fez-se o arranque dos pilotos com lamas ativadas da ETAR de Parada e a fase de adaptação das lamas ao efluente industrial foi realizada com uma mistura de efluente doméstico e industrial, tendo sido gradualmente reduzido ao longo do tempo a quantidade de efluente doméstico e aumentada a quantidade de efluente industrial, como se pode observar na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Plano de arranque dos SBR

DIA	AFLUENTE ETAR PARADA	AFLUENTE AQUITEX
21/10/2021	3000 ml	-----
22/10/2021	2800 ml	200 ml
23/10/2021	2600 ml	400 ml
24/10/2021	2400 ml	600 ml
25/10/2021	2200 ml	800 ml
26/10/2021	2000 ml	1000 ml
27/10/2021	1800 ml	1200 ml
28/10/20021	1600 ml	1400 ml
29/10/2021	1400 ml	1600 ml
30/10/2021	1200 ml	1800 ml
31/10/2021	1000 ml	2000 ml
01/11/2021	800 ml	2200 ml
02/11/2021	600 ml	2400 ml
03/11/2021	400 ml	2600 ml
04/11/2021	200 ml	2800 ml
05/11/2021	-----	3000 ml

Iniciaram-se os ensaios com ciclos de 24 horas, tendo sido atribuído a cada uma das fases os seguintes tempos:

1. Enchimento: 5 horas
2. Arejamento: 8 horas
3. Sedimentação: 8 horas
4. Extração: 3 horas

A fase de enchimento e extração foi realizada de forma manual; por se tratar de uma instalação de pequenas dimensões estas operações eram realizadas num curto espaço de tempo, o que contribuiu para o aumento de tempo de sedimentação. As figuras 3.7 e 3.8 mostram as fases de arejamento e sedimentação, respetivamente.



Figura 3.7 – SBR na fase de arejamento



Figura 3.8 – SBR na fase de sedimentação

3.4. Instalação experimental do leito de macrófitas

Para os ensaios do leito de macrófitas, procedeu-se à criação de um leito subsuperficial horizontal, com um volume de 3 m³.

Para a construção deste modelo, foram utilizados 5 contentores de 1000 L, também designado por recipiente de capacidade intermédia (IBC), observável na figura 3.9.



Figura 3.9 – Contentor de 1000 L

Os 5 IBC foram cortados a meio e foram inseridos em cada um tubos em PVC perfurados para entrada e saída do efluente, como indicado nas figuras 3.10 e 3.11. O recipiente de cada unidade tem 1200 mm de comprimento, 1000 mm de largura e 600 mm de altura. O tubo de saída foi colocado a 500 mm de altura.

Desta forma, cada unidade tem um volume de 600L e o somatório das 5 unidades perfaz 3 m³.



Figura 3.10 – Entrada e saída do efluente

De seguida, foram colocados em linha e com desnível para que a água passasse de uns para os outros por gravidade, como se pode ver na figura 3.11.



Figura 3.11 – Leito de macrófitas em teste hidráulico

Depois de realizado o teste hidráulico e se verificar que não existiam fugas, fez-se o enchimento do leito com várias granulometrias de brita e areia. De baixo para cima foram colocadas 4 camadas pela seguinte ordem:

1. Brita 31/56 mm – 200 mm (figura 3.12)
2. Brita 14/20 mm – 100 mm (figura 3.13)
3. Brita 4/10 mm – 100 mm (figura 3.14)
4. Areia média 0/4 mm – 100 mm (figura 3.15)



Figura 3.12 - Brita 31/56 mm



Figura 3.13 - Brita 14/20 mm



Figura 3.14 - Brita 4/10 mm



Figura 3.15 - Areia média 0/4 mm

O enchimento do leito funciona como filtro e como suporte para as plantas macrófitas. Foram plantados os caniços no leito como mostra a figura 3.16.



Figura 3.16 – Plantação dos caniços no leito

Na figura 3.17, é possível visualizar o depósito que recebe o efluente do leito, o qual foi equipado com uma bomba com boia de nível que transfere o efluente para um IBC. A alimentação do leito foi executada com recurso a uma bomba doseadora que debita um caudal máximo de 21,9 L/h.



Figura 3.17 – Zona de saída do leito



Figura 3.18 – Caniços em fase de desenvolvimento

3.5. Controlo analítico

Para avaliar os resultados obtidos nos ensaios, foram analisados os seguintes parâmetros: CQO, CBO5, pH, azoto total, fósforo reativo e fósforo total.

As amostras do efluente bruto foram recolhidas à entrada do TFQ e as amostras do TFQ foram recolhidas à saída do TFQ. No caso dos SBR, foram recolhidas amostras da alimentação e do clarificado no final do ciclo.

Internamente foram controlados os valores de pH e da CQO. A figura 3.18, mostra o medidor de pH utilizado da marca HANNA, modelo HI 2215 pH/ORP Meter, e para a determinação da CQO foi utilizado um termoreator da marca Merck, modelo TR320 (figura 3.19) e um espectrofotómetro também da mesma marca, modelo Spectroquant Prove 300 (figura 3.20).

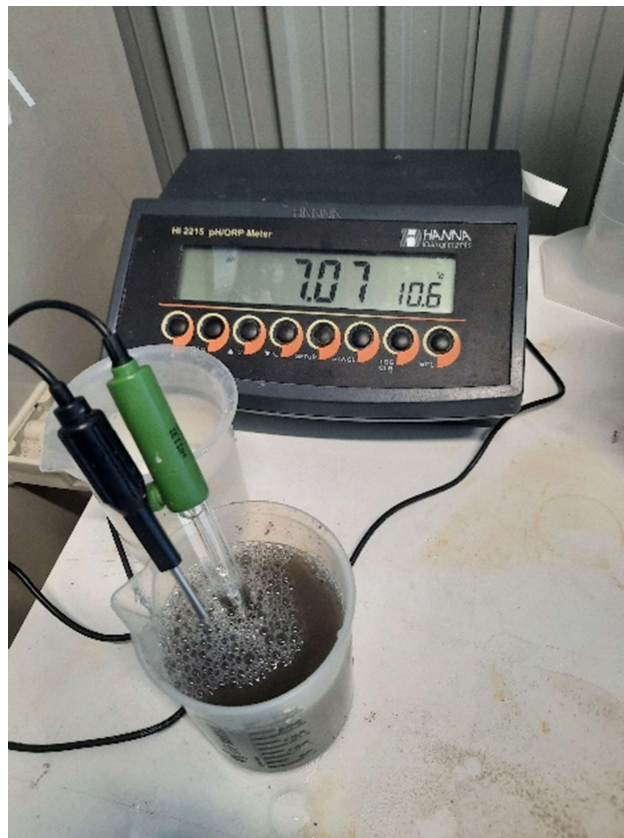


Figura 3.19 – Medidor de pH



Figura 3.20 – Termoreator



Figura 3.21 - Espectrofotómetro

3.6. Cálculo da eficiência

A avaliação da eficiência de remoção da MO foi realizada através de CQO e CBO₅. A sua fórmula é apresentada pela equação 3.1.

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = \frac{V_i - V_f}{V_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde V_i corresponde à variável avaliada no início do ciclo de operação e V_f corresponde à variável no final do ciclo de tratamento; ou seja, do efluente tratado.

4. Resultados

Este capítulo está subdividido em três partes: a primeira em que se pretende verificar as vantagens da utilização do TFQ para alimentação do SBR; uma segunda parte onde se pretende mostrar a eficiência do SBR; e a última parte sobre o leito de macrófitas.

4.1. 1ª Fase – Determinar o melhor processo de tratamento

Os ensaios da primeira fase iniciaram-se a 5 de novembro, com término a 9 de dezembro. O reator SBR1 foi alimentado com o efluente industrial tal e qual e o reator SBR2 com o efluente do TFQ; ambos fizeram o mesmo ciclo de 24 horas.

Antes do arranque dos SBR, foi necessário colocar em funcionamento o TFQ e otimizar o processo para aumentar a sua eficiência; paralelamente, foram identificadas as causas para a grande variação do efluente industrial e tomadas medidas para se conseguir um efluente o mais homogéneo possível.

4.1.1. Recolha dos restos dos contentores/lavagem dos reatores

A falta de recolha dos restos de produtos que ficam no fundo dos contentores vazios, e que são lavados na empresa para reutilização, assim como os restos de produtos que ficam num reator após uma produção, mostrou ser uma das causas para a grande variação da CQO das águas residuais. Estes restos iam para o tanque de receção das águas residuais no momento da lavagem, e, para que isso não acontecesse, procedeu-se à sua recolha para um recipiente (média de 5 kg de produto por contentor/reator) (fotografia da estrutura de recolha no anexo F). O efeito deste procedimento é exibido na figura 4.1.

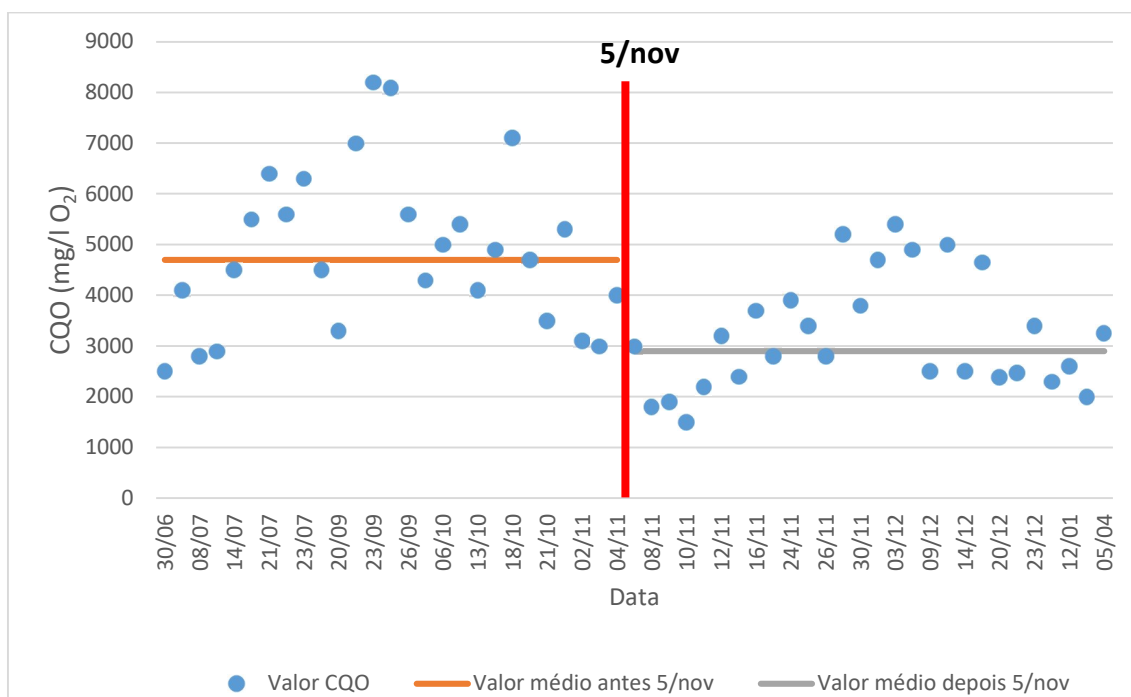


Figura 4.1 – Efeito da recolha dos restos de produtos nos valores da CQO nos ensaios realizados entre junho de 2021 e abril de 2022 (valores apresentados no anexo B)

No dia 5 de novembro, iniciou-se a recolha dos restos de produtos; como é possível observar na figura 4.1, previamente ao dia 5, os valores da CQO apresentam uma variação muito grande dos valores, com uma média de 4700 mg/L O₂, com um máximo e mínimo dos valores registados de 8200 mg/L e 2500 mg/L, respetivamente. A recolha permitiu reduzir a amplitude do intervalo dos valores da CQO, obtendo-se uma média de 2900 mg/L O₂, com um máximo e mínimo dos valores registados de 5400 mg/L O₂ e 1500 mg/L O₂, respetivamente. Com esta medida, foi possível uma descida dos valores da CQO de aproximadamente 38%.

4.1.2. Otimização TFQ

Para esta fase, foi necessário colocar o TFQ já existente em funcionamento. Na ocasião da aquisição do equipamento, este mostrou ter uma eficiência muito reduzida; com a mudança da soda cáustica para cal e do coagulante policloreto de alumínio para cloreto férrico, obteve-se uma melhoria do rendimento do processo; por outro lado, a realização dos ensaios do *Jar Test* auxiliou na quantificação das quantidades de coagulante e floculante. Afigurou-se como desvantagem a existência de apenas um tanque

de homogeneização e a enorme diversidade de produtos, que podem interferir na reação de coagulação/floculação.

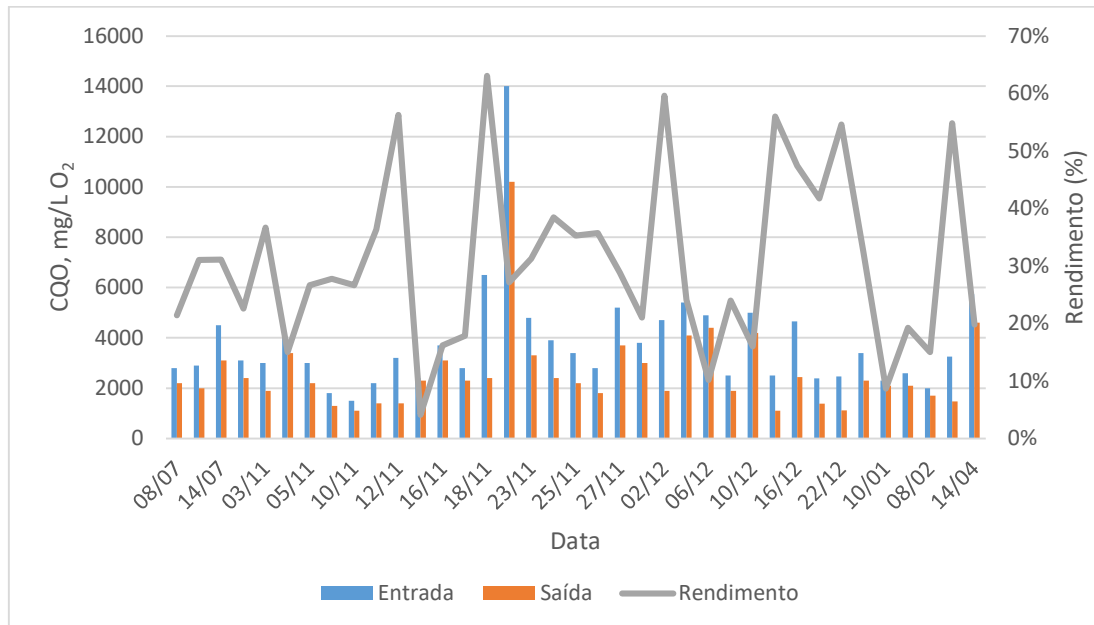


Figura 4.2 – Redução da CQO e rendimento no TFQ nos ensaios realizados entre julho de 2021 e abril de 2022

Como se verifica na figura 4.2, o TFQ apresenta uma grande variação no seu rendimento, tendo uma eficiência média de 28% na redução da CQO.

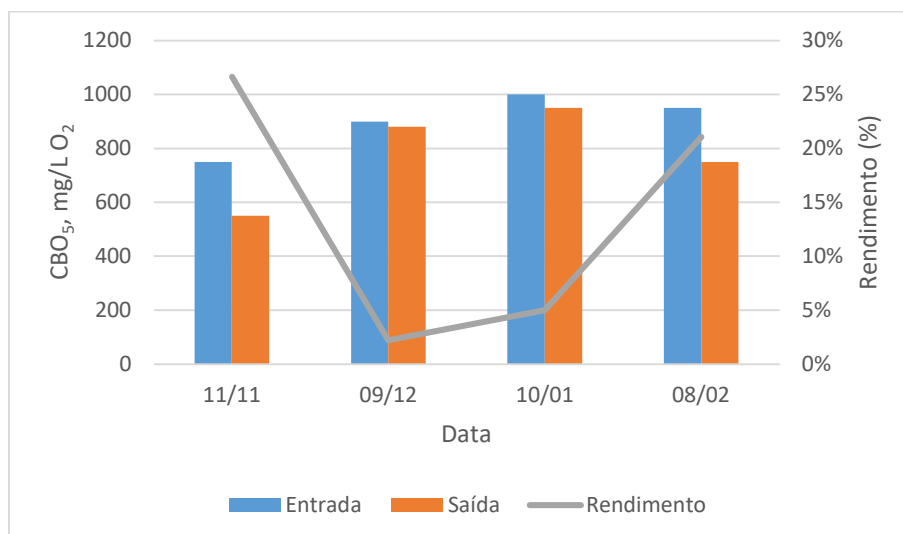


Figura 4.3 – Rendimento CBO₅ no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022

Como se observa na figura 4.3, a CBO₅ sofre uma ligeira redução de 13%, sendo a média de entrada de 925 mg/L O₂ e a média de saída de 815 mg/L O₂.

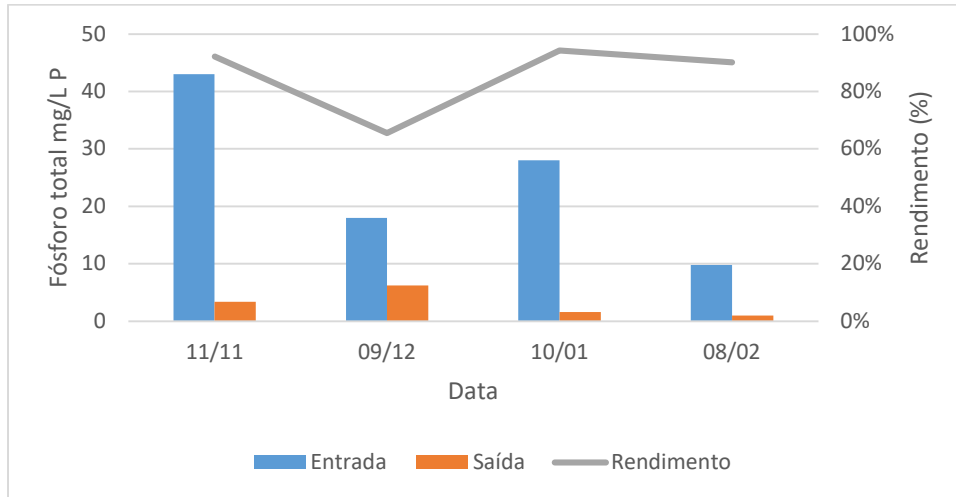


Figura 4.4 – Redução fósforo total no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022

A figura 4.4 mostra que o fósforo total do efluente industrial tem um valor médio inicial de 23 mg/L P e após o TFQ 3 mg/L P. O processo físico-químico mostrou-se eficiente com uma redução média de 91%. O fósforo reativo apresenta uma redução idêntica ao fósforo total, como se pode verificar na figura 4.5.

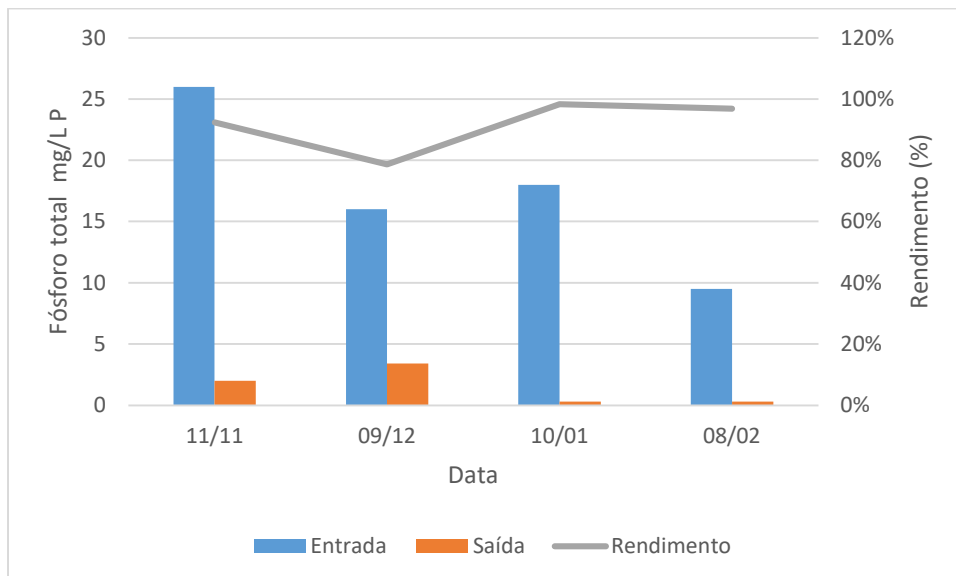


Figura 4.5 – Redução fósforo reativo no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022

O mesmo já não se pode afirmar em relação ao azoto total, que, como observado na figura 4.6, teve uma descida média de apenas 12%, significando isto que o TFQ não

foi suficientemente eficaz na sua redução; como alternativa e já referido anteriormente, foi estudado o auxílio de um leito de macrófitas.

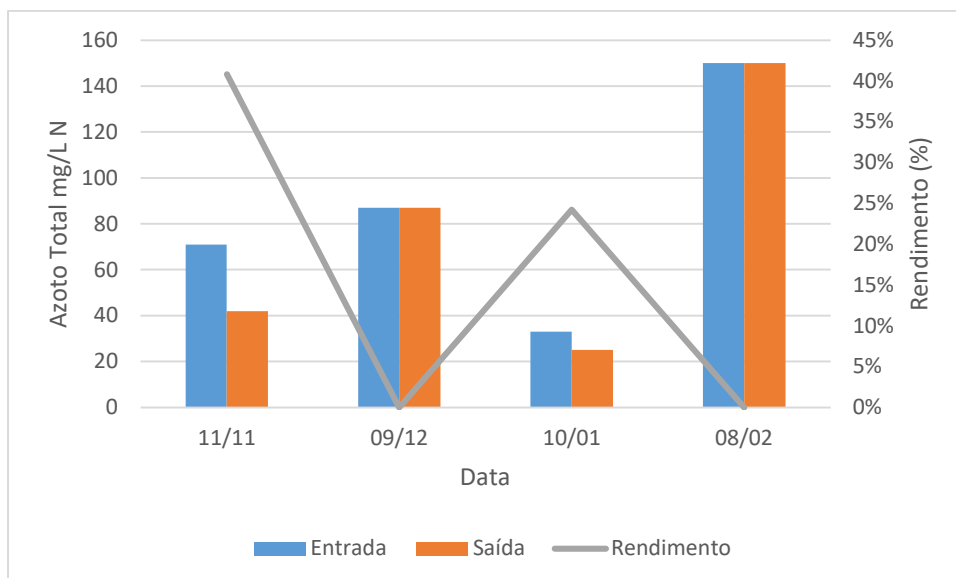


Figura 4.6 – Redução da concentração do azoto total no TFQ entre julho de 2021 e fevereiro de 2022

Na figura 4.7 apresenta-se dois exemplos do efluente de entrada e saída do TFQ; como se pode observar, o efluente sai bastante mais límpido após o TFQ, existindo uma redução significativa da turvação.

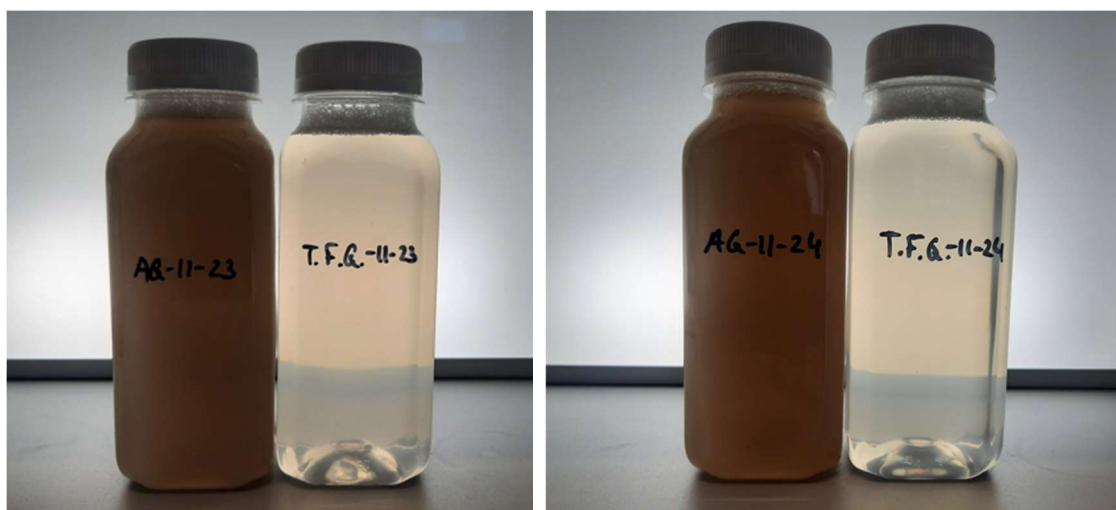


Figura 4.7 – Exemplo dos resultados obtidos no TFQ, em 23/11/2021 (esquerda), 24/11/2021 (direita)

4.1.3. SBR – Ensaio com o efluente

Nas figuras 4.8 e 4.9 apresenta-se os resultados dos ensaios com o efluente tal e qual e com o efluente do TFQ nos reatores SBR1 e SBR2, respetivamente.

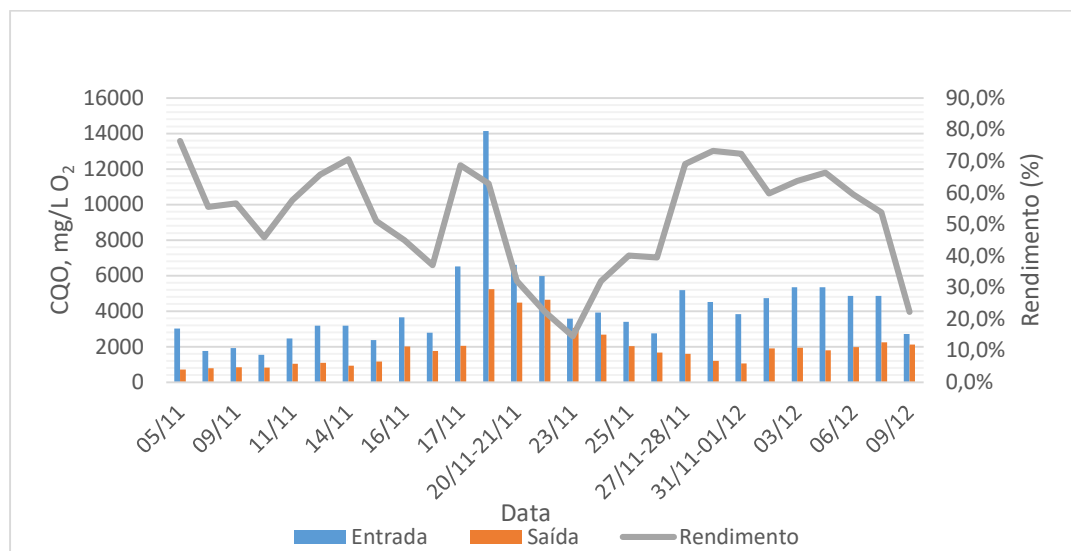


Figura 4.8 – Remoção da CQO no SBR1, com efluente tal e qual, nos ensaios realizados entre novembro e dezembro de 2021

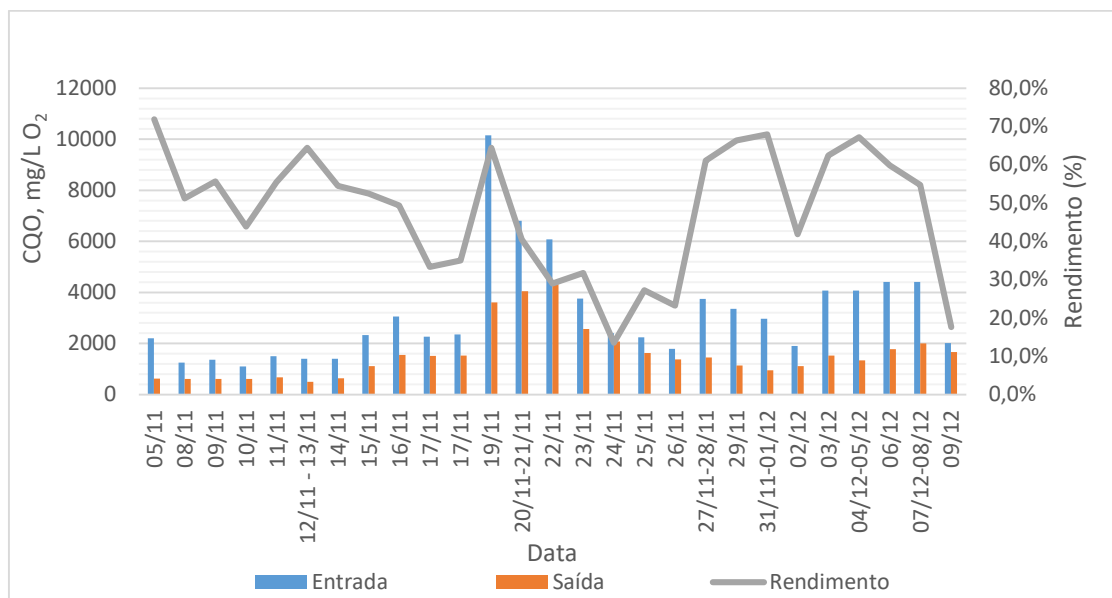


Figura 4.9 – Remoção da CQO no SBR2, com efluente do TFQ, nos ensaios realizados entre novembro e dezembro de 2021

Tabela 4.1 – Valores médios de CQO e rendimento nos SBR

	SBR1	SBR2
Média CQO entrada (mg/L O₂)	3390	2265
Média CQO saída (mg/L O₂)	1665	1335
Rendimento Médio	56,6%	54,4%

Comparando as figuras 4.8 e 4.9, concluiu-se que os pilotos apresentaram rendimentos médios idênticos. Observou-se ainda que, devido às temperaturas baixas sentidas no período em questão, existiu uma grande variação no rendimento dos ensaios realizados (fator adverso para um tratamento biológico), observado posteriormente neste estudo.

Apesar disto, é possível indicar que o efluente que alimentou o SBR2 – com tratamento primário (TFQ) - é o mais indicado para alimentar o SBR, pois apresentou valores de CQO, CBO₅, fósforo, azoto e SST mais baixos devido à redução significativa da turvação e permitiu também obter um efluente com pH corrigido para valores ideais para o tratamento biológico.

4.2. 2ª Fase – Estabilização do processo de tratamento com o SBR

Iniciou-se a 2ª fase do processo a 11 de dezembro, com a alimentação dos SBR com o mesmo efluente, proveniente do TFQ, por uma questão de reprodutibilidade do processo.

Nesta fase retirou-se uma conclusão importante sobre a influência da temperatura no rendimento. Como se pode observar na figura 4.10, nas datas compreendidas entre o dia 11 de dezembro e 9 de janeiro, existiu uma grande variação no rendimento de remoção da CQO, com uma eficiência média de 48%. A temperatura do efluente neste período oscilou entre 5°C e 15°C, noite e dia respetivamente.

A colocação de duas resistências elétricas possibilitou a estabilização da temperatura entre os 20°C e os 25°C e rendimento passou a ser de 70% (figura 4.11), o que se traduziu num aumento de 45% no rendimento dos SBR na redução dos valores da CQO.

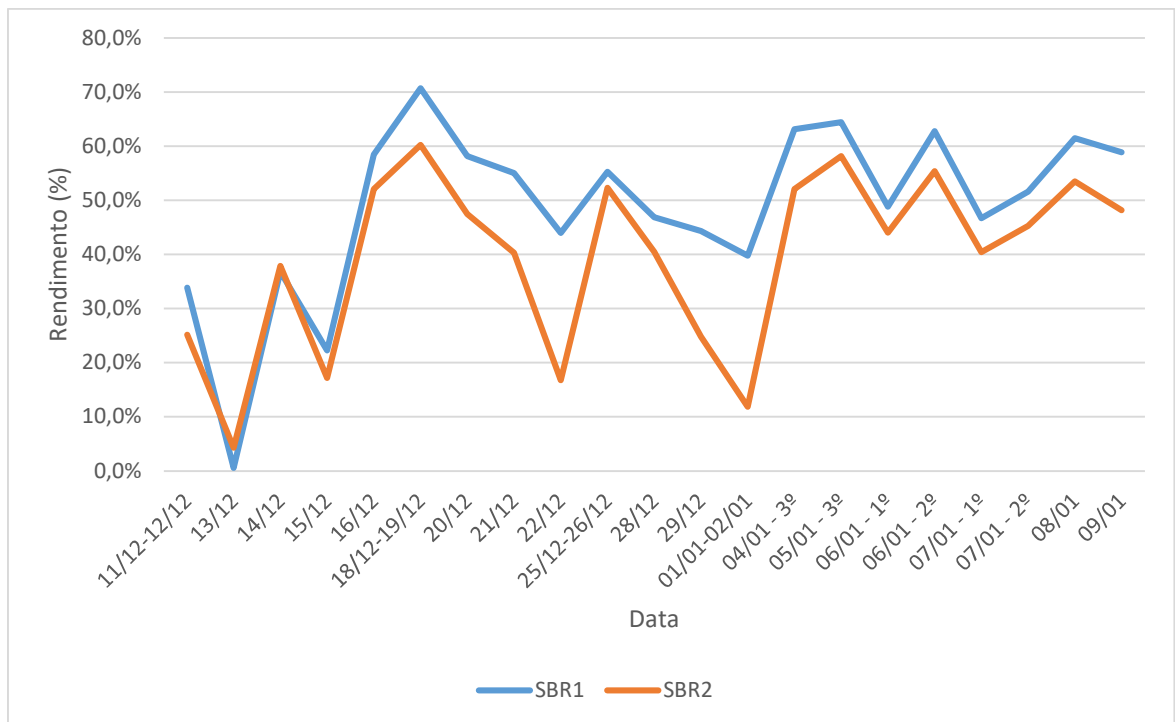


Figura 4.10 – Rendimento dos SBR sem aquecimento na remoção da CQO, nos ensaios realizados entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022 (valores apresentados no anexo B)

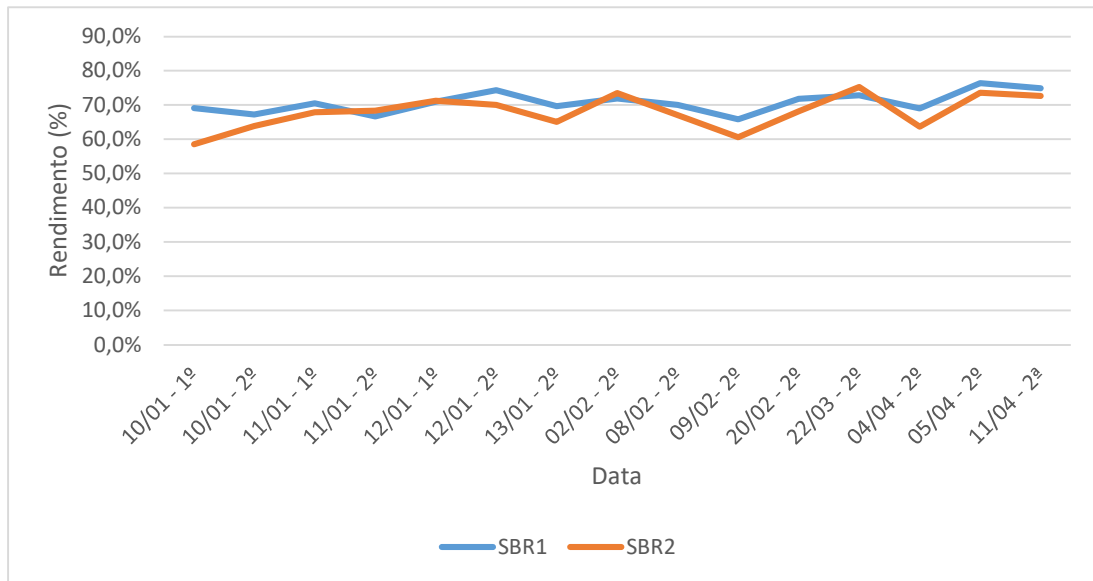


Figura 4.11 – Rendimento dos SBR com aquecimento, nos ensaios realizados entre janeiro e abril de 2022

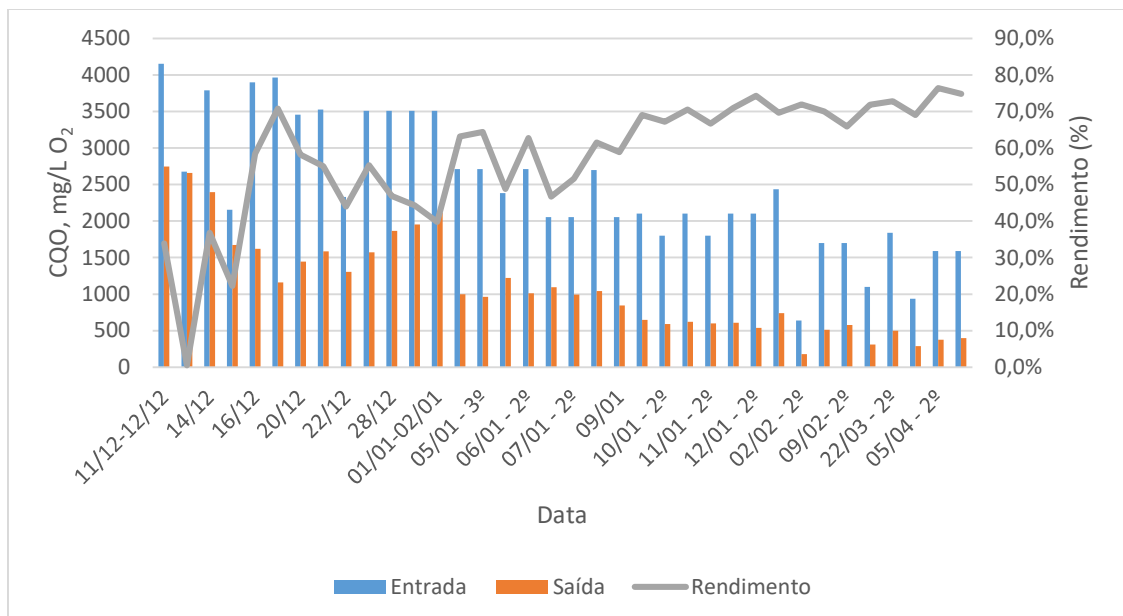


Figura 4.12 – Rendimento do SBR1 na remoção da CQO, nos ensaios entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022

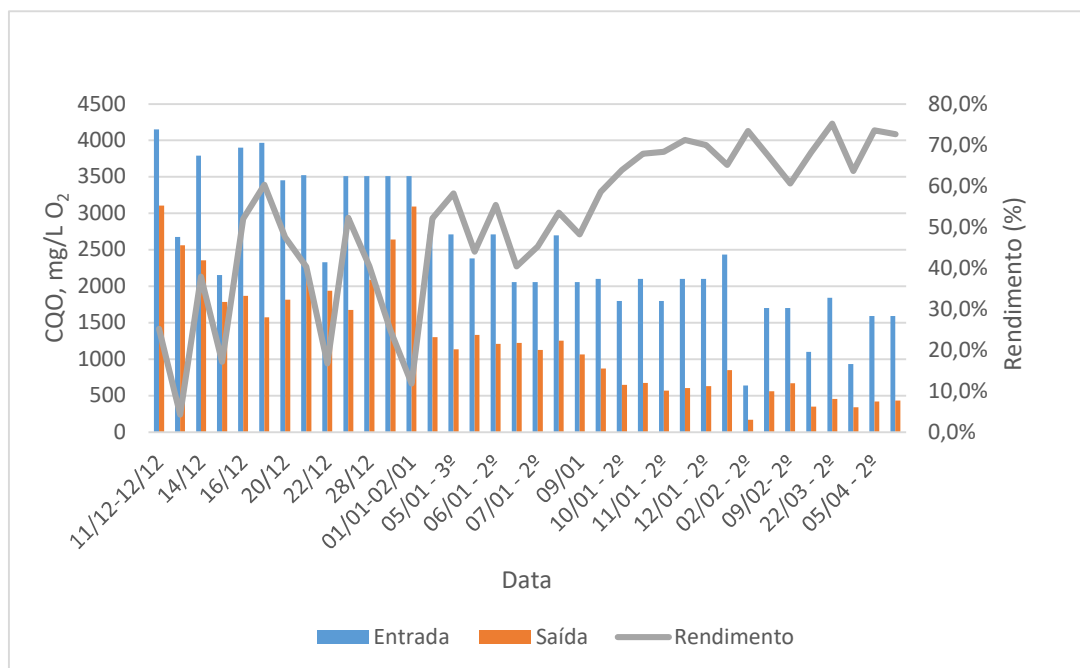


Figura 4.13 – Rendimento do SBR2 na remoção da CQO, nos ensaios entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022

O controlo da temperatura também melhorou o rendimento na redução da CBO₅, como se pode observar na figura 4.14, tendo sido obtida uma redução efetiva de 80%.

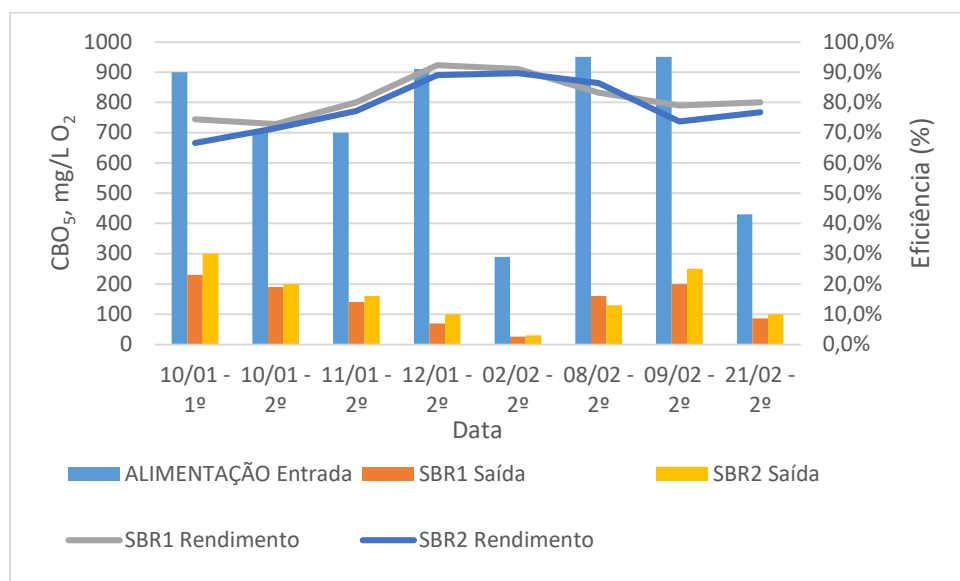


Figura 4.14 – Rendimento SBR na redução da CBO₅, nos ensaios realizados entre janeiro e fevereiro de 2022 (valores apresentados no anexo D)

Com o tratamento biológico, a concentração de azoto teve uma redução média de 20%, como se pode observar na figura 4.15. O problema do excesso de azoto, a rondar 74 mg/L, não foi solucionado com esta redução, pelo que se afigurou a sua resolução com um já mencionado leito de macrófitas.

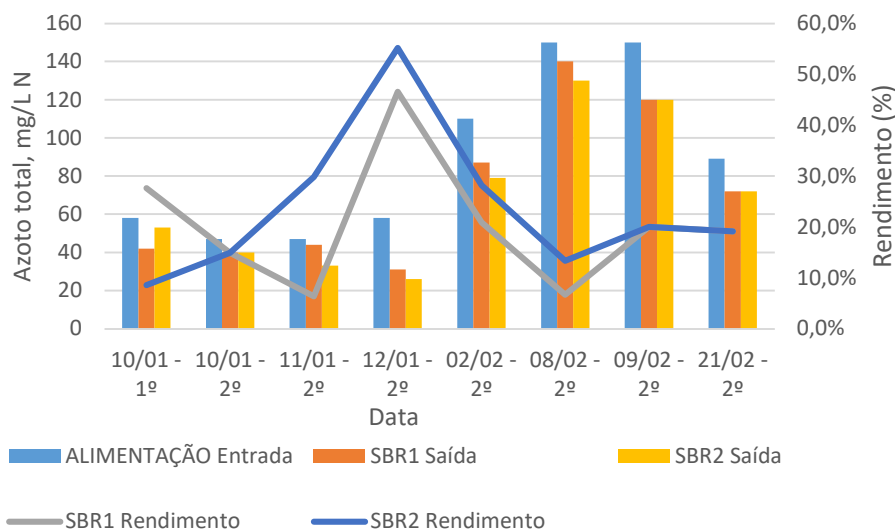


Figura 4.15 – Rendimento dos SBR na remoção da concentração de azoto, nos ensaios realizados entre janeiro e fevereiro de 2022

Na figura 4.16, verifica-se que a concentração de fósforo se mantém com valores baixos, tanto no efluente de alimentação, como no efluente de saída. Conclui-se que o TFQ é o principal responsável pela redução da concentração de fósforo.

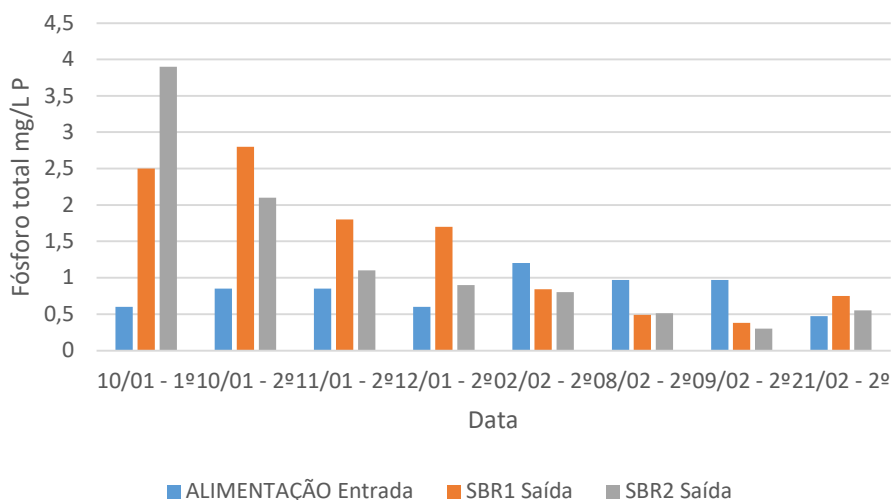


Figura 4.16 – Rendimento SBR2 na remoção do fósforo total

Resumindo, conclui-se que o efluente proveniente do TFQ é o melhor para alimentar o SBR e que com a estabilização da temperatura dos SBR foi possível melhorar a eficiência da redução dos valores da CQO e da CBO5. Relativamente ao fósforo, este é maioritariamente removido no TFQ.

A concentração de azoto, por sua vez, tem uma pequena redução tanto no TFQ como no SBR; decidiu-se então implementar um leito de macrófitas com o objetivo de reduzir a concentração de azoto para valores aceitáveis.

4.3. Leito de macrófitas

Pretendeu-se com o leito de macrófitas fazer um polimento ao efluente gerado pelo tratamento biológico. Como o efluente dos SBR pilotos era insuficiente para alimentar o leito de macrófitas piloto, este foi alimentado com o efluente do TFQ.

Nas seguintes figuras, da 4.17 à 4.20, observa-se a evolução das plantas macrófitas. Os caniços foram plantados em dezembro de 2021 e só em abril de 2022 começaram a desenvolver-se.



Figura 4.17 – Leito de macrófitas em abril/2022



Figura 4.18 – Leito de macrófitas em maio/2022



Figura 4.19 – Leito de macrófitas em junho/2022



Figura 4.20 – Leito de macrófitas em junho/2022

Em junho de 2022, período que corresponde às figuras 4.19 e 4.20, observa-se que as plantas já estão bem desenvolvidas, mas ainda são muito pequenas para se tirar

conclusões. Contudo, no final de julho do mesmo ano, foram realizadas análises aos efluentes de entrada e saída.

Tabela 4.2 – Análise ao efluente do leito de macrófitas

380L/d - t_{RH}: 3d 16h	CQO mg/L O₂	CBO₅ mg/L O₂	P mg/L P	N mg/L N
Alimentação macrófitas	270,0	65,0	9,2	350,0
Saída macrófitas	220,0	45,0	6,5	300,0
Rendimento, %	18,5	30,8	29,3	14,3

Como os caniços ainda não estavam totalmente desenvolvidos, estes resultados na tabela 4.2 não foram considerados válidos (só se poderão realizar testes ao efluente quando as plantas atingirem o estado adulto. Indica-se, contudo, que estudos realizados com leitos de macrófitas indicam uma eficiência na remoção de azoto entre os 40 e os 50%. Segundo Dotro, 2007⁶, um leito de macrófitas com escoamento subsuperficial horizontal apresenta uma eficiência de remoção de 89% na CQO, de 93% na COB₅, 95% para os SST, 41% NH₄-N, 37% para o azoto total e 46% para o fósforo total.

⁶ Dotro, 2007, pp.67-68

5.Scale-Up

5.1.Tratamento proposto

Para o tratamento do efluente industrial da Aquitex, S.A. e de acordo com o trabalho efetuado, é proposto o seguinte processo de tratamento, que se pode visualizar na figura 5.1, para se conseguirem valores dos parâmetros da água inferiores aos valores máximos admissíveis para descarga na rede de drenagem pública e também com o intuito da sua reutilização.

O tratamento será composto pelos seguintes processos:

- 1) Tratamento primário – composto pelo tratamento físico-químico
- 2) Tratamento secundário – composto pelo tratamento biológico, que será um processo de lamas ativadas realizado num reator descontínuo sequencial (SBR)
- 3) Tratamento terciário – composto pelo leito de macrófitas

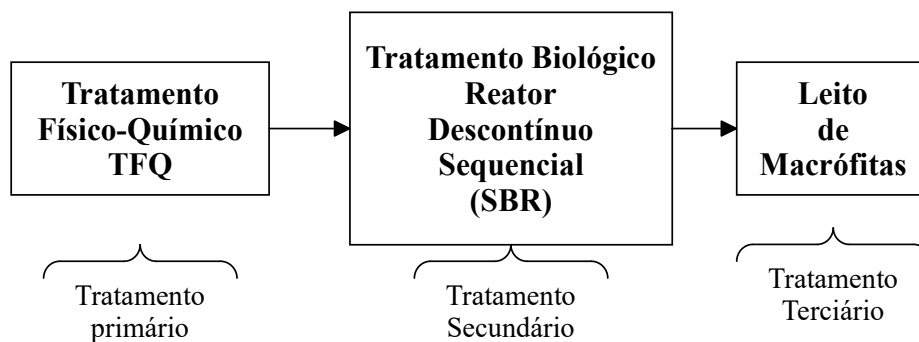


Figura 5.1 – Esquema tratamento proposto

5.2.Dimensionamento do tratamento físico-químico

Uma vez que o tratamento físico-químico já se encontra construído, não existiu necessidade do seu dimensionamento; contudo, no futuro, este poderá ser um equipamento limitante. Na tabela 5.1, apresenta-se o tempo necessário para tratar 6 m^3

em função do caudal, assim como o esforço da máquina e o tempo de retenção no tanque de floculação.

Tabela 5.1 – Condições TFQ para produzir 6 m³ de efluente

Caudal (m³/h)	Esforço equipamento	Tempo de residência tanque de floculação (min)	Tempo necessário para tratar 6m³ (h)
0,25	50%	24	24
0,30	60%	20	20
0,35	70%	17	17
0,40	80%	15	15
0,45	90%	13	13
0,50	100%	12	12

5.3. Dimensionamento do SBR

Recordando, o tratamento biológico num SBR é realizado por fases no mesmo reator, o qual tem como característica única não ter recirculação das lamas ativadas, uma vez que o arejamento e a sedimentação são efetuados no mesmo tanque.

Segundo Metcalf & Eddy (2016), para o dimensionamento de um SBR é necessário ter atenção a questões como a extração das lamas em excesso, à cinética do processo e à escolha das condições operacionais. Com estes dados é possível calcular o volume do reator, os requisitos de oxigénio e a produção de lamas.

Na figura 5.2 apresenta-se o balanço de massa ao SBR com base nos dados do reator piloto, onde são apresentados os valores médios do caudal gerado e da concentração de CQO, CBO₅ e azoto.

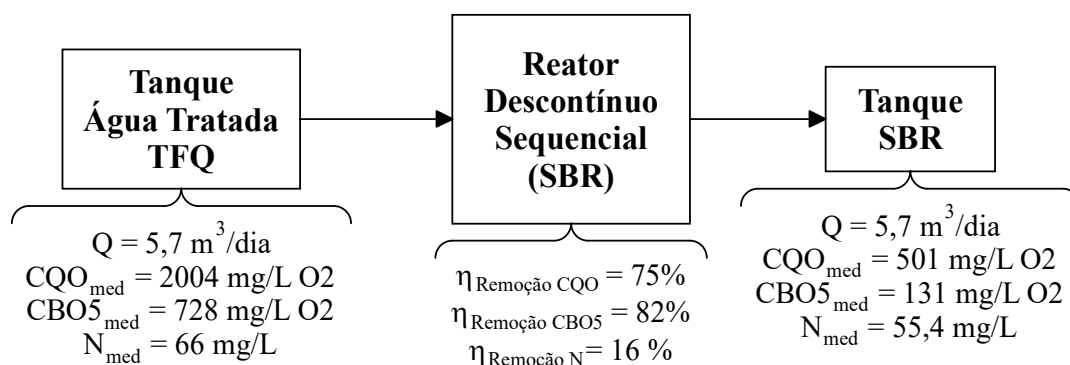


Figura 5.2 – balanço de massa do SBR piloto

5.3.1. Condições operacionais

Na tabela 5.2 apresenta-se os parâmetros para os cálculos do dimensionamento do SBR.

Tabela 5.2 – Condições operacionais

Parâmetros	Unidade	Valor
Número de ciclos	-	2
Tempo de ciclo	H	12
Tempo de enchimento	H	1
Tempo de reação/arejamento	H	7
Tempo de sedimentação	H	3
Tempo de extração	H	1
Volume de enchimento	m ³	6
Volume enchimento/Volume útil do reator	Fração	40%
TRS	d	20
Caudal de descarga	L/min	100
Diâmetro reator	mm	2450
Altura total de líquido	mm	3180

Nota: Alguns tempos aqui descritos são passíveis de modificação consoante o que o operador pretende (por exemplo, o tempo de enchimento), pelo que estes dados deverão ser considerados como apenas de referência.

5.3.2. Cálculo do volume do reator

Volume de enchimento = 6 m³

Volume de enchimento/Volume total reator = 40%

$$V_{\text{ÚTIL}} = \frac{V_{\text{Enchimento/reator}}}{0.4} = \frac{6 \text{ m}^3/\text{reator}}{0.4} = 15 \text{ m}^3/\text{reator}$$

Altura total de liquido = 3180 mm

Altura decantação = 0,4 × (3180 mm) = 1272 mm

Para tratar 6 m³ de efluente é necessário um reator SBR com um volume útil de 15m³. Para se obter uma margem livre de 20 cm impõe-se mais 1 m³, pelo que se propõe um reator com 16 m³. Para um diâmetro de 2450 mm, a altura total do reator será 3400mm. Na tabela 5.3 apresentam-se as especificações do reator SBR.

Tabela 5.3 – Parâmetros reator SBR

SBR		
Parâmetros	Unidade	Valor
Volume total	m ³	16
Altura	mm	3400
Diâmetro	mm	2450

5.3.3. Dimensionamento do arejamento

A quantidade de O_2 necessária para o arejamento do reator de lamas ativadas é dada pela expressão 5.1 (Goodman & Englande, 1974 citado por Benefield & Randall, 1985, citado por Monte, 2018, p.55).

$$R_{O_2} \left(\frac{kg O_2}{ciclo} \right) = Q(S_0 - S)a' + V(MLVSS)b' \quad (5.1)$$

$$\Leftrightarrow R_{O_2} = 6 \times (728 - 131) \times 0,55 + 15 \times 4000 \times 0,06$$

$$\Leftrightarrow R_{O_2} = 79,6 \frac{kg O_2}{ciclo} = \frac{66,3 m^3 O_2}{ciclo}$$

Como o tempo de arejamento são 7 horas, o $R_{O_2} = \frac{9,5 m^3 O_2}{h}$, logo a quantidade de ar necessária é, $R_{Ar} 45,1 m^3 \frac{Ar}{h}$.

Em que:

R_{O_2} – Quantidade de O_2 necessário para o arejamento

Q – Caudal de afluente ao SBR ($m^3/ciclo$)

S_0 – Concentração em CBO_5 do afluente (kg/m^3)

S – Concentração em CBO_5 do efluente (kg/m^3)

V – Volume de ML a arejar (m^3)

$MLVSS$ – Concentração do ML no SBR (kg/m^3) (tabela 5.4)

a' – Parâmetro “oxidação” ($kg O_2/kg CBO_5$ removida) (valores típicos na tabela 5.4)

b' – Parâmetro “respiração endógena” ($kg O_2/ (kg MLVSS.d)$) (valores típicos na tabela 5.4)

R_{Ar} – Quantidade de Ar necessário para o arejamento ($m^3 \frac{Ar}{h}$)

Tabela 5.4 – Critérios para dimensionamento das necessidades de oxigénio na fase de arejamento (processos biológicos)

Tipologia	MLSS (mg/L)	MLVSS (mg/L)	O2 requerido		trs (d)
			Oxidação a' (kg O2/kg CBO5 removida)	Respiração endógena b' (kg O2/(kg MLVSS.d))	
Baixa carga ou arejamento prolongado	2000-5000	3000-5000	0,55	0,06	20-40

(Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003, citado por Monte, 2018, pp 87)

Para os cálculos da quantidade de oxigénio requerido, considerou-se uma eficiência de 70% na transferência de oxigénio para o líquido e um fator de segurança de 10. A tabela 5.5 resume as necessidades de arejamento, isto é, a quantidade de oxigénio a ser fornecido ao SBR.

Tabela 5.5 – Necessidades de arejamento no SBR

Parâmetros	Unidade	Valor
Respiração do substrato	kg O ₂ / kg CBO ₅ removido	0,55
Respiração endógena	kg O ₂ / (kg MLVSS.d)	0,06
MLVSS	mg/L	4000
<u>Necessidades de oxigénio</u>		
Quantidade de O ₂ por ciclo	kg O ₂ /ciclo	79,6
	m ³ O ₂ /ciclo	66,3
Tempo de arejamento	h	7
Caudal de oxigénio	m ³ O ₂ /h	9,5
Caudal de ar	m ³ Ar/h	45,1
Cauda de ar máximo fornecido pelo compressor	m ³ Ar/h	50
Caudal por difusor de bolha fina	m ³ Ar/h	4
Número de difusores	unidades	12

5.3.4. Produção de lamas

A produção de lamas, segundo Metcalf & Eddy (2016, p. 692), pode ser calculada pelo método baseado na taxa de produção de lamas observada, como mostra a equação 5.2., na qual se determina o excesso de lamas (P_x) através da sua relação com o rendimento do crescimento da biomassa em função da carga orgânica degradada.

$$P_x = Y_{obs}Q(S_0 - S) \quad (5.2)$$

$$\Leftrightarrow P_x = 0,12 \times 6 \times (0,728 - 0,131) \Leftrightarrow P_x = 0,42 \text{ kg/ciclo}$$

Com 2 ciclos/d e um fator de segurança de 20%, a produção de lama será, $P_x = 1 \text{ kg/d}$.

Em que:

Y_{obs} – Rendimento de crescimento da biomassa observado (kg biomassa/ kg S removido), não considerando os SS arrastados no efluente;

Q – Caudal de afluente ao SBR (m^3/d)

S_0 – Concentração em CBO_5 do afluente (kg/m^3)

S – Concentração em CBO_5 do efluente (kg/m^3)

A determinação da quantidade de lamas é efetuada a partir do tempo de retenção de sólidos (t_{RS}), aplicando a expressão 5.3, que estima o rendimento do crescimento da biomassa em função do tempo de retenção de sólidos. Na tabela 5.6 apresenta-se os valores típicos de crescimento da biomassa. Admite-se um $t_{RS} = 20 \text{ d}$ (tabela 5.4), o qual é compatível com o regime de arejamento prolongado.

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1+k_d t_{RS}} \quad (5.3)$$

$$\Leftrightarrow Y_{obs} = \frac{0,4}{1+0,12 \times 20}$$

$$\Leftrightarrow Y_{obs} = 0,12 \text{ kg biomassa / kg } S_{removido}$$

Em que:

Y – Rendimento total de crescimento da biomassa (kg biomassa/ kg S removido) incluindo os SS contidos no efluente;

k_d – Coeficiente de decaimento na fase endógena (1/d);

t_{RS} – Tempo de retenção de sólidos (d).

Tabela 5.6 – Constantes cinéticas para bactérias heterotróficas a 20°C

Constantes	Unidade	Valor
Y	g SSV / g CBO5 removido	0,4
k_d	g SSV / (g SSV.d)	0,12

(Metcalf & Eddy, 2003, Adaptado de Monte, 2018, pp 331)

5.3.5. Volume de lamas sedimentadas a extrair

Com 2 ciclos por dia, estima-se a produção de 1 kg de lamas diárias. Considerando que se procederá a uma extração de lamas semanal, foi necessário calcular o volume de lamas a extrair; tendo sido também considerado um fator de segurança (f_s) de 1,5.

Admitindo que o MLVSS é 4000 mg/L (tabela 5.4), calculou-se a concentração das lamas decantadas com a equação 5.4.

$$C_L \times V_L = C_T \times V_T \quad (5.4)$$

$$\Leftrightarrow C_L \times 9 = 4 \times 15 \Leftrightarrow C_L = \frac{4 \times 15}{9} \Leftrightarrow C_L = 6,7 \text{ kg/m}^3$$

Em que,

C_L – Concentração de lamas decantadas, kg/ m³

V_L – Volume de lamas decantadas, m³

C_T – Concentração de lamas total, kg/ m³

V_T – Volume de lamas total, m³

O volume de lamas a extrair ($V_{Lamas\ Extrair}$) foi calculado com a equação 5.5. Prevendo que o SBR irá funcionar nos cinco dias úteis da semana, obter-se-á uma produção de lamas semanal ($P_{x\ semanal}$) igual a 5 kg por semana.

$$V_{Lamas\ Extrair} \left(\frac{m^3}{semana} \right) = \frac{P_{x\ semanal}}{C_L} \times f_s \quad (5.5)$$

$$\Leftrightarrow V_{Lamas\ Extrair} = \frac{5}{6,7} \times 1,5 \Leftrightarrow V_{Lamas\ Extrair} = 1,12\ m^3/semana$$

Serão extraídas semanalmente 1,12 m³ de lamas, pelo que será necessário dimensionar um leito de secagem para recolher as lamas.

5.3.6. Leito de secagem de lamas

Foi, desta forma, dimensionado um leito de secagem convencional, com areia, o qual é o método mais utilizado para secar pequenas quantidades de lama. Segundo Metcalf & Eddy (2016, p.1559), neste tipo de leitos, é habitual depositar-se sobre o leito de areia uma camada de 200 a 300 mm de lamas, para que estas possam secar. A percentagem maior da água é removida pela drenagem e a restante por evaporação da superfície exposta ao ar.

Na construção do leito, a drenagem deve ter tubos perfurados com uma inclinação de 1% e este devem estar cobertos com brita. A espessura da camada de areia pode variar entre 200 e 460 mm e deve ter um fator de uniformidade de 4 e um tamanho efetivo entre 0,3 e 0,75 mm. Também se pode utilizar camadas de areia/brita com várias granulometrias, da mais grossa até mais fina.

A carga de sólidos é o parâmetro mais utilizado para o dimensionamento do leito de secagem e varia entre os 50 a 125 kg/m².ano. Para efeitos do presente estudo, será considerada uma carga de sólidos de 100 kg/m².ano. Com a equação 5.6, calcula-se a área do leito:

$$\text{Área do leito} = \frac{\text{quantidade lamas}}{\text{carga de sólidos}} \quad (5.6)$$

$$\Leftrightarrow \text{Área do leito} = \frac{1,12 \times 6,7 \times 52}{100} \Leftrightarrow \text{Área do leito} = 4 \text{ m}^2$$

Tabela 5.7 – Resumo dos parâmetros do leito de secagem

Parâmetros	Unidade	Valor
Carga de sólidos	kg/m ² .ano	100
$V_{Lamas \text{ Extrair}}$	m ³ /semana	1,12
C_L	kg/ m ³	6,7
Quantidade de lamas	kg/semana	7,5
Área do leito	m ²	4

Numa situação ideal, deverão existir 2 leitos, a utilizar alternadamente (enquanto um está em uso, o outro está em limpeza). Poderá ainda ser recomendado cobrir o leito para o proteger da chuva.

Tabela 5.8 – Estrutura do leito de secagem

Parâmetros	Unidade	Valor
Área do leito	m ²	4
Altura de lamas	mm	280
Altura de brita	mm	200
Altura de areia	mm	460
Altura livre	mm	500
Altura total	mm	1440

5.4. Dimensionamento do leito macrófitas

Pretende-se replicar a instalação piloto o número de unidades necessárias para tratar 30m^3 por semana de efluente tratado pelo SBR em 5 dias. O leito de macrófitas irá trabalhar 7 dias por semana, o que se traduz num volume diário a tratar de $4,3\text{m}^3$.

Uma unidade piloto do leito de macrófitas tem as seguintes características:

$V = \text{Volume leito de macrófitas (filtro)} = 2,8 \text{ m}^3$

$n = \text{Porosidade do material filtrante em \%} = 50\%$

$Q_m = \text{Caudal médio afluente} = 0.350 \text{ m}^3/\text{d}$

Cálculo do tempo de retenção (t)

$$t = n \times \left(\frac{V}{Q_m} \right) = 0,5 \times \left(\frac{2,8}{0,350} \right) = 4 \text{ dias}$$

Cálculo do número de unidades de macrófitas

$Q_{\text{diário}} = 4,3 \text{ m}^3/\text{d}$

$Q_m = 0,350 \text{ m}^3/\text{d}$

$$N^{\circ} \text{ Unidades} = \frac{Q_{\text{diário}}}{Q_m} = \frac{4,3}{0,350} = 12,3 \text{ unidades}$$

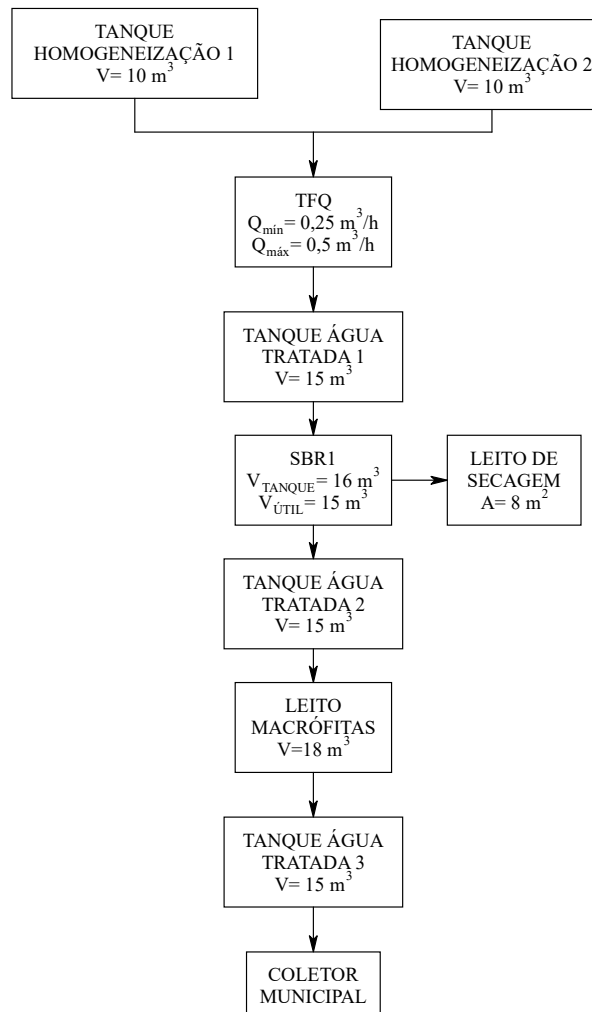
Considera-se que são, assim, necessárias 13 unidades iguais à instalação piloto.

5.5. Resumo do processo de tratamento proposto e dos parâmetros de projeto

Na figura 5.3 apresenta-se o esquema do processo proposto, o qual, resumidamente, é composto por dois tanques homogeneização de 10m^3 que irão alimentar o TFQ de forma alternada. Serão efetuadas no TFQ as reações de coagulação e floculação. O efluente do TFQ será armazenado num tanque de 15m^3 , o qual irá alimentar o reator SBR.

No SBR decorrerá, por sua vez, o tratamento biológico. O efluente do SBR será armazenado num tanque de 15m^3 o qual irá alimentar o leito de macrófitas. As lamas produzidas pelo SBR serão encaminhadas para um leito de secagem. O leito de macrófitas fará um polimento final ao efluente. O efluente do leito de macrófitas será armazenado num tanque de 15m^3 para posterior descarga no coletor ou para recuperação.

Figura 5.3 – Esquema do processo proposto



6. Conclusões

Considerando o objetivo global deste trabalho – estudar, à escala laboratorial, um processo para o tratamento biológico do efluente da Aquitex, S.A., e para tal utilizar um reator descontínuo sequencial e implementá-lo à escala industrial – os resultados obtidos indicam que o tratamento estudado consegue reduzir os parâmetros da água para valores abaixo dos máximos admissíveis para descarga no coletor municipal, estando, no entanto, condicionada pelas características da água a tratar.

Explanando, na caracterização do efluente industrial foi possível concluir que este apresenta efetivamente uma grande variação nos seus parâmetros, em especial no que concerne à CQO. Esta variação foi reduzida com a implementação da recolha dos restos dos produtos, quer nos reatores usados para fabrico, quer nos contentores vazios, antes da sua lavagem, o que permitiu estabilizar os parâmetros da água residual gerada.

Os ensaios com o SBR permitiram concluir que:

- É vantajoso utilizar o efluente do TFQ para alimentar o SBR. Com o tratamento físico-químico obtém-se um efluente com menor turbacão, com menor carga orgânica e com o pH estabilizado;
- O processo de lamas ativadas pelo método SBR confirmou a sua eficiência no tratamento do efluente industrial da Aquitex, S.A.;
- Com dois ciclos diários de 12 horas de tratamento, consegue-se uma eficiência de remoção da CQO de aproximadamente 75%, de 80% na redução da CBO₅ e 20% no azoto;
- O aquecimento do efluente é fundamental para a eficiência do processo.

Como o TFQ e o SBR mostraram ser pouco eficientes na redução da concentração de azoto, foi necessário complementar o processo de tratamento com um leito de macrófitas, embora não tenha sido possível tirar conclusões, devido ao facto de os caniços não estarem desenvolvidos. De acordo com a literatura, é expectável que se consiga uma redução de todos os parâmetros do efluente, em especial do azoto, com uma redução entre 40 e 50%.

Este trabalho permitiu propor um processo de tratamento para o efluente industrial e executar o seu scale-up. Foi proposto como tratamento primário o tratamento físico-

químico, utilizando para isso equipamento já instalado na empresa, o qual vai realizar uma coagulação-floculação. O tratamento secundário é precedido pelo TFQ, esta fase consiste num tratamento biológico, através de um processo de lamas ativadas, utilizando um SBR. Finalmente, terá lugar um tratamento terciário, que pretende fazer um polimento final ao efluente, através de um leito de macrófitas.

Com este tratamento pretende-se conseguir atingir os valores máximos admissíveis para descarga no coletor municipal da Maia e posteriormente poder reutilizar a água em zonas específicas de forma a reduzir o consumo global da empresa.

7.Referências

- AQUITEX, S.A. (2 de Janeiro de 2022). Obtido de <http://www.aquitex.pt>
- Beleza, V. M., & Teixeira, F. C. (1999). Tratamento de águas. *Tratamento de águas residuais, texto didático*, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto.
- Bitton, G. (2005). *Wastewater Microbiology* (3^a ed.). Florida: Wiley.
- Bungay, S., Humphries, M., & Stephenson, T. (2007). Operating Strategies for variable flow sequencing batch reactors. *Water and Environment Journal*, 1-8.
- Cybis, L. F., Santos, A. V., & Gehling, G. R. (2004). Eficiência do reator sequencial em batelada (RSB) na remoção de nitrogénio no tratamento de esgoto doméstico com DQO baixa. *Eng. sanit. ambient. - vol. 9 - N°3 - jul/set 2004*, 260-264.
- Dotro, G. L. (2007). *Volume 7 Treatment Wetlands in Biological Wastewater Treatment Series*. IWA publishing, London.
- Geraldi, M. H. (2010). *Troubleshooting the Sequencing Batch Reactor*. Wiley.
- Lopes, C. L. (2011). *Efeito da aeração e do tempo de ciclo na remoção biológica de nitrogênio de efluente da indústria avícola*. Tese de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Engenharia Agrícola. 62 pp.
- Marconi, R. G. (2001). *Definição do ciclo operacional de um reator sequencial em batelada aeróbio (SBR) para tratamento de esgoto sanitário*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. 164 pp.
- Metcalf, & Eddy. (2016). *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos* (5^a ed.). (I. Hespanhol, & J. C. Mierzwa, Trads.) AMGH Editora.
- Monte, H. M., Santos, M. T., & Barreiros, A. M. (2018). *Tratamento de águas residuais: processos de tratamento biológico*. Lisboa: ERSAR; ISEL.
- Poltak, R. F. (2005). *Sequencing Batch Reactor Design And Operational Considerations*. Lowell, MA: New England Interstate Water Pollution Control Commission. 27pp.
- Restrepo, A., Rodríguez, D. C., & Peñuela, G. A. (2020). Eficiencia de un reactor SBR para la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual de una industria de teñido de flores. *Revista ION*, 47-59.
- Roy, R. R., & Aditya, A. (2016). A Review on applicability and design of sequencing batch Reactor. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 245-256.
- Santos, A. V., Cybis, L. F., & Gehling, G. R. (2007). Dimensionamento do volume do reator sequencial em batelada (RSB) com enchimento estático. *Eng. sanit. ambient. Vol.12 - N° 4 - out/dez 2007*, 380-388.

- Spellman, F. R. (2003). *Handbook of water & wastewater treatment plant operations*. Lewis Publishers.
- Sperling, M. V. (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (2ª Edição Revisada ed., Vol. I). Belo Horizonte: DESA-UFMG.
- Sperling, M. v. (2007). *Basic Principles of Wastewater Treatment* (Vol. II). IWA Publishing. 196pp.
- Vymazal, J. (2007). *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*. *Science of the Total Environment*, 380(1-3), 48–65.

Anexos

Anexo A – Resultados das análises para a caracterização do efluente

Na figura A.1 são apresentados os resultados os valores de pH e CQO para a caracterização do efluente industrial.

Tabela A.1 – Dados caracterização efluente

DATA	pH	CQO (g/L O₂)
30/06/2021	7,40	2,5
06/07/2021	---	4,1
08/07/2021	---	2,8
12/07/2021	---	2,9
14/07/2021	---	4,5
20/07/2021	6,28	5,4
21/07/2021	7,51	6,4
22/07/2021	7,04	5,6
23/07/2021	2,81	6,3
17/09/2021	1,60	4,5
20/09/2021	3,54	3,3
22/09/2021	7,25	7,0
23/09/2021	5,88	8,2
24/09/2021	6,79	8,1
26/09/2021	5,04	5,6
27/09/2021	4,37	4,3
06/10/2021	3,66	5,0
11/10/2021	4,95	5,4
13/10/2021	6,55	4,1
15/10/2021	3,30	4,9
18/10/2021	3,35	7,1
20/10/2021	---	4,7
21/10/2021	---	3,5
27/10/2021	7,28	5,3
01/11/2021	5,63	---
02/11/2021	---	3,1
03/11/2021	5,79	3,0
04/11/2022	----	4,0

Anexo B – Resultados das análises dos diferentes efluentes

Nas tabelas B.1 à B.4 são apresentados os resultados das análises ao efluente bruto e ao efluente com tratamento físico-químico, assim como os resultados do efluente gerado pelo tratamento biológico nas SBR pilotos.

Tabela B.1 – Afluente bruto

DATA	pH	CQO mg/L O ₂	CBO5 mg/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
05/11/2021	5,08	3000				
08/11/2021	6,79	1800				
09/11/2021	6,92	1900				
10/11/2021	6,66	1500				
11/11/2021	7,03	2200	750	43	26	71
12/11/2021	6,40	3200				
15/11/2021	6,62	2400				
16/11/2021	6,15	3700				
17/11/2021	5,31	2800				
18/11/2021	6,23	6500				
19/11/2021	6,63	14000				
20/11/2021	6,78	6600				
22/11/2021	6,56	6000				
23/11/2021	6,29	4800				
24/11/2021	6,56	3900				
25/11/2021	6,8	3400				
26/11/2021	6,53	2800				
27/11/2021	6,51	5200				
30/11/2021	6,75	3800				
02/12/2021	6,75	4700				
03/12/2021	6,08	5400				
06/12/2021	4,86	4900				
09/12/2021	3,76	2500	900	18	16	87
10/12/2021	3,48	5000				
14/12/2021	7,5	2500				
16/12/2021	6,77	4650				
20/12/2021	7,84	2385				
22/12/2021	3,20	2465				
23/12/2021	5,68	3400				
10/01/2022	6,25	2300	1000	28	18	33

Tabela B.1 – Efluente bruto (*continuação*)

DATA	pH	CQO mg/L O ₂	CBO5 mg/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
12/01/2022	6,11	2600				
19/01/2022	6,54					
08/02/2022	6,66	2000	750	9,8	9,5	150
24/02/2022	5,77					
08/03/2022	4,39					
05/04/2022	7,53	3255				

Tabela B.2 – Efluente resultante do TFQ

DATA	pH	CQO g/L O ₂	CBO5 g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
08/07/2021		2200	510			120
12/07/2021		2000	570			190
14/07/2021		3100	720			93
02/11/2021	9,74	2400				
03/11/2021	6,25	1900				
04/11/2021	5,28	3400				
05/11/2021	6,15	2200				
08/11/2021	7,22	1300				
10/11/2021	8,37	1100				
11/11/2021	7,22	1400	550	3,4	2	42
12/11/2021	8,37	1400				
15/11/2021	5,85	2300				
16/11/2021	6,83	3100				
17/11/2021	6,87	2300				
18/11/2021	8,66	2400				
19/11/2021	6,91	10200				
20/11/2021	6,67	6800				
22/11/2021	6,53	6100				
23/11/2021	6,49	3300				
24/11/2021	6,25	2400				
25/11/2021	6,61	2200				
26/11/2021	6,62	1800				
27/11/2021	6,56	3700				
30/11/2021	6,85	3000				
02/12/2021	6,46	1900				
03/12/2021	5,64	4100				
06/12/2021	6,08	4400				
09/12/2021	6,39	1900	880	6,2	3,4	94
10/12/2021	6,34	4200				

Tabela B.2 – Efluente resultante do TFQ (continuação)

DATA	pH	CQO g/L O ₂	CBO5 g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
13/12/2021	6,04	2700				
14/12/2021	6,2	1100				
16/12/2021	7,11	2445				
20/12/2021	6,72	1390				
22/12/2021	6,80	1120				
23/12/2021	7,13	2300				
10/01/2022	6,86	2100	950	1,6	<0,3	25
12/01/2022	7,17	2100				
19/01/2022	6,95					
08/02/2022	7,58	1700	950	0,97	0,3	150
24/02/2022	6,8					
08/03/2022	6,87					
05/04/2022	6,84	1470				
14/04/2022	6,92	4600				

Tabela B.3 – Efluente resultante do SBR1

DATA	pH	CQO mg/L O ₂	CBO5 mg/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
04/11/2021	7,45					
05/11/2021	7,56					
06/11/2021	7,72					
08/11/2021	8,30	710				
09/11/2021	8,18	785				
10/11/2021	8,06	835				
11/11/2021	7,92	1200	240	40	32	85
12/11/2021	7,90	1045				
14/11/2021	6,99	1090				
15/11/2021	7,67	935				
17/11/2021	6,42	2010				
18/11/2021	6,79	1760				
19/11/2021	7,14	2045				
20/11/2021	7,04	5245				
22/11/2021	7,34	4480				
23/11/2021	7,12	4640				
24/11/2021	7,43	3055				
25/11/2021	7,35	2670				
26/11/2021	7,39	2030				
27/11/2021	7,39	1665				
29/11/2021	7,36	1600				
30/11/2021	7,64	1205				

Tabela B.3 – Efluente resultante do SBR1 (*continuação*)

DATA	pH	CQO mg/L O₂	CBO5 mg/L O₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
02/12/2021	7,92	1060				
03/12/2021	7,3	1905				
06/12/2021	7,95	1800				
07/12/2021	7,76	1970				
09/12/2021	7,68	2245				
10/12/2021	7,37	2115				
14/12/2021	5,33	2660				
15/12/2021	7,54	2395				
16/12/2021	8,20	1675				
17/12/2021	7,82	1620				
20/12/2021	7,85	1160				
21/12/2021	7,78	1445				
22/12/2021	7,64	1585				
23/12/2021	7,53	1305				
27/12/2021	7,51	1570				
29/12/2021	7,40	1865				
30/12/2021	7,37	1955				
03/01/2022	7,42	2115				
05/01/2022	7,51	1000				
06/01/2022	7,55	965				
07/01/2022	7,58	1010				
08/01/2022	7,63	995				
09/01/2022	7,75	1040				
10/01/2022	7,88	650	230	2,5	<0,3	42
11/01/2022	7,90	590	190	2,8	<0,3	40
12/01/2022	7,75	600	140	1,8	<0,3	44
13/01/2022	7,91	540	70	1,74	<0,3	31
14/01/2022	7,68	740				
18/01/2022	7,49	600				
19/01/2022	7,61					
03/02/2022	8,29	180	26	0,8	<0,3	87
09/02/2022	7,88	510	160	0,5	<0,3	130
10/02/2022	7,87	580	200	0,4	<0,3	120
21/02/2022	7,94	310	86	0,75	<0,3	72
11/03/2022	8,08	400				
23/03/2022	8,64	500				
05/04/2022	8,13	290				
06/04/2022	8,04	375				
11/04/2022	8,08	400				

Tabela B.4 – Efluente resultante do SBR2

DATA	pH	CQO mg/L O2	CBO5 mg/L O2	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
04/11/2021	7,48					
05/11/2021	7,56					
06/11/2021	7,73					
08/11/2021	8,39	620				
09/11/2021	8,22	610				
10/11/2021	8,20	605				
11/11/2021	8,15	570	220	4,5	1,5	68
12/11/2021	7,84	670				
14/11/2021	7,24	500				
15/11/2021	7,55	640				
17/11/2021	6,73	155				
18/11/2021	6,97	1510				
19/11/2021	7,19	1530				
20/11/2021	6,92	1610				
22/11/2021	7,01	4050				
23/11/2021	7,12	4320				
24/11/2021	7,47	2565				
25/11/2021	7,35	2080				
26/11/2021	7,35	1630				
27/11/2021	7,41	1375				
29/11/2021	7,40	1455				
30/11/2021	7,75	1130				
02/12/2021	7,89	950				
03/12/2021	7,63	1105				
06/12/2021	7,98	1335				
09/12/2021	7,55	2000				
10/12/2021	7,42	1665				
13/12/2021		3105				
14/12/2021	5,94	2560				
15/12/2021	7,17	2355				
16/12/2021	8,01	1785				
17/12/2021	7,79	1870				
20/12/2021	7,74	1575				
21/12/2021	7,77	1815				
22/12/2021	7,71	2105				
23/12/2021	7,66	1940				
27/12/2021	7,63	1675				
29/12/2021	7,44	2090				

Tabela B.4 – Efluente resultante do SBR2 (*continuação*)

DATA	pH	CQO mg/L O₂	CBO₅ mg/L O₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
30/12/2021	7,41	2640				
03/01/2022	7,38	3095				
05/01/2022	7,37	1300				
06/01/2022	7,41	1135				
07/01/2022	7,56	1210				
08/01/2022	7,63	1125				
09/01/2022	7,82	1255				
10/01/2022	7,76	870	300	3,9	<0,3	53
11/01/2022	7,86	650	200	2,1	<0,3	40
12/01/2022	7,67	570	160	1,1	<0,3	33
13/01/2022	7,88	630	100	0,9	<0,3	26
14/01/2022	7,64	850				
18/01/2022	7,56	790				
19/01/2022	7,58					
03/02/2022	8,25	170	30	0,8	<0,3	79
09/02/2022	8,25	560	130	0,51	<0,3	130
10/02/2022	7,87	670	0,25	<0,3	<0,3	120
21/02/2022	7,81	350	100	0,55	<0,3	72
23/03/2022	8,62	455				
05/04/2022	8,2	340				
06/04/2022	8,11	420				
11/04/2022	8,15	435				

Anexo C – Procedimento *Jar Test*

O *jar test* simula, em escala laboratorial, o processo de coagulação-floculação e sedimentação. Permite determinar qual é a melhor pH e as quantidades de coagulante e floculante que garantem a melhor reação de coagulação floculação.

Este teste serve igualmente para avaliar o desempenho de vários auxiliares de coagulação e coagulantes utilizados no tratamento de águas residuais.

Procedimento experimental *Jar Test*

Equipamento: Floculador da marca VELP, modelo JLT 4, com 4 posições de agitação

Reagentes:

- Suspensão de cal a 10%
- Coagulante – Solução a 10% de cloreto férrico 40%
- Floculante – Solução 2 g/l Vafloct 974

Materiais:

- 4 gobelés
- 1 proveta de 1000 ml

Procedimento do teste:

1. Medir volumes iguais de amostras para cada um dos vasos, normalmente 1000 ml. Ao vaso 1 não se adiciona nenhum produto. Nos vasos 2, 3 e 4 são adicionadas diferentes quantidades de coagulante e acertado o pH em cada um deles. Ligar a agitação a 120 rpm durante 2 minutos, como se pode visualizar na figura 0.1.

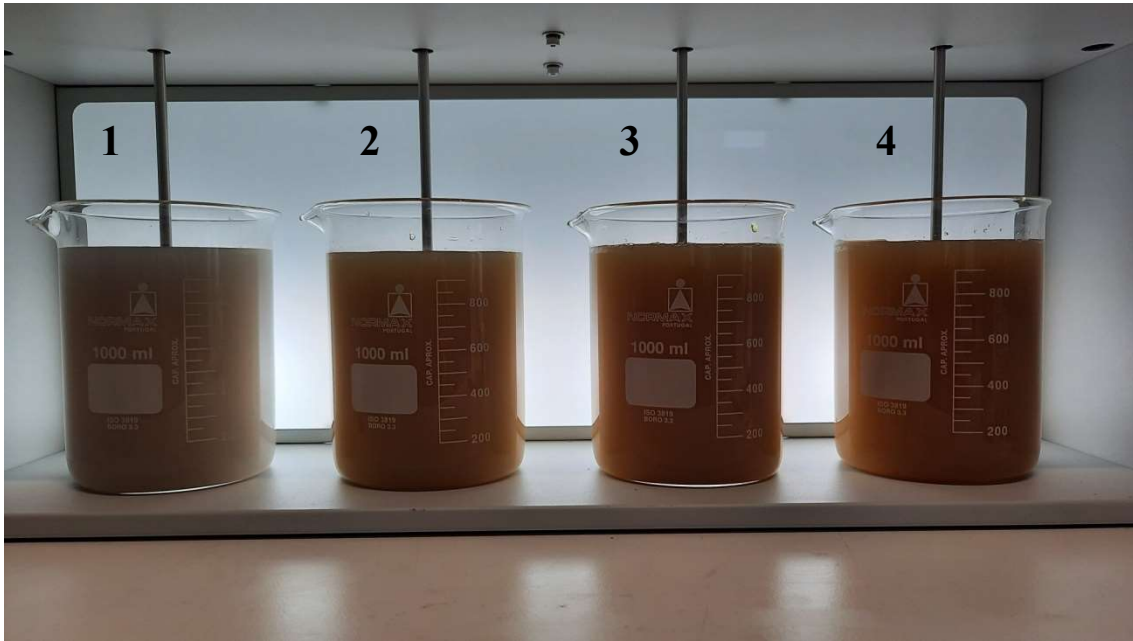


Figura C.1 - Amostras com coagulante e acerto de pH, 120rpm, 2 minutos

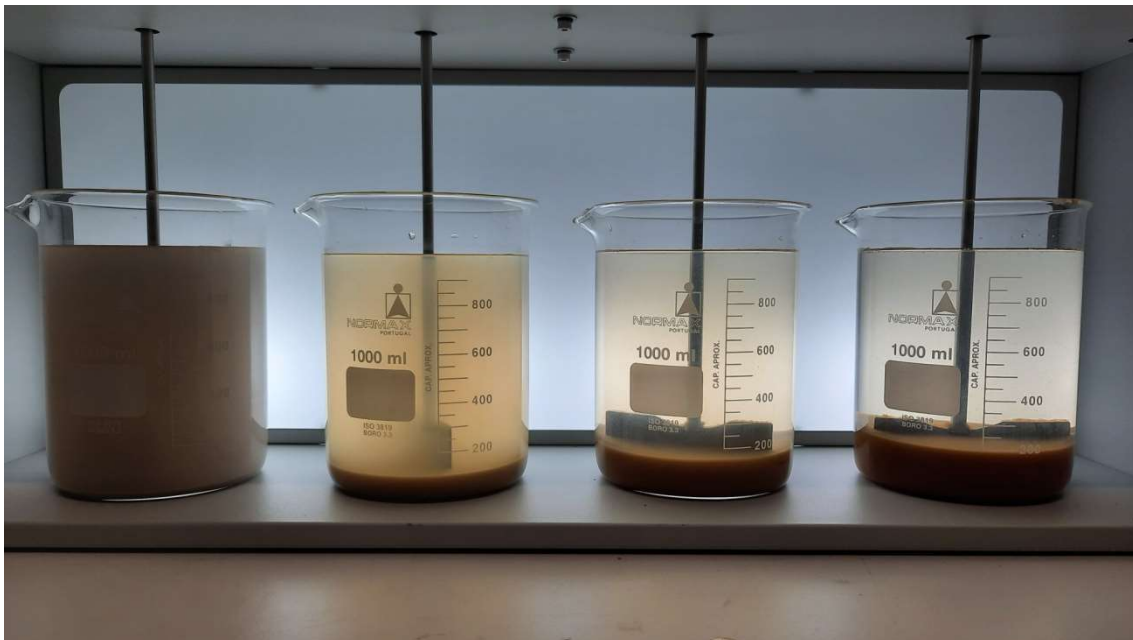


Figura C.2 – Amostras na fase de sedimentação, após 2 minutos de agitação a 120 rpm

2. Com a agitação e sedimentação só com coagulante e acerto de pH fica-se com uma ideia da reação.

Adicionar 1 ml da solução de floculante aos vasos 2, 3 e 4. Ligar a agitação 120rpm durante 2 minutos, findo este tempo colocar a 60rpm durante 8 minutos e finalmente a 20rpm durante 12 minutos



Figura c.3 – Amostras no final do *jar test*

3. No final do ensaio analisa-se de forma visual o aspeto das amostra em relação à turbacão e à quantidade de sedimentos.

Anexo D – Resultados das análises aos SBR (2ª Fase)

Nas tabelas D.1 a D.8 são apresentados os resultados obtidos nas análises efetuadas ao efluente do SBR e respetivos rendimentos.

Tabela D.1 – Rendimento SBR no 1º ciclo do dia 10/01/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 01 - 10 - Saída TQF	2,1	0,9	0,6	< 0,3	58,0
SBR1 - 01 - 10 (17h00) – Clarificado	0,65	0,23	2,5	< 0,3	42,0
SBR2 - 01 - 10 (17h00) – Clarificado	0,87	0,30	3,9	< 0,3	53,0
Rendimento do SBR1, %	69,0	74,7			27,6
Rendimento do SBR2, %	58,6	67,0			8,6

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.2 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 10/01/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 01 - 10/1 - Saída TQF	1,80	0,70	0,85	< 0,3	47,0
SBR1 - 01 - 11 – Clarificado	0,59	0,19	2,8	< 0,3	40,0
SBR2 - 01 - 11 – Clarificado	0,65	0,20	2,1	< 0,3	40,0
Rendimento do SBR1, %	67,2	72,9			14,9
Rendimento do SBR2, %	63,9	71,4			14,9

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.3 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 11/01/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 01 - 10/1 - Saída TQF	1,80	0,70	0,85	< 0,3	47,0
SBR1 - 01 - 12 – Clarificado	0,60	0,14	1,8	< 0,3	44,0
SBR2 - 01 - 12 – Clarificado	0,57	0,16	1,1	< 0,3	33,0
Rendimento do SBR1, %	66,7	80,0			6,4
Rendimento do SBR2, %	68,3	77,1			29,8

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.4 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 12/01/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 01 - 10 - Saída TQF	2,1	0,91	0,6	< 0,3	58,0
SBR1 - 01 - 13 – Clarificado	0,54	0,07	1,7	< 0,3	31,0
SBR2 - 01 - 13 – Clarificado	0,63	0,10	0,9	< 0,3	26,0
Rendimento do SBR1, %	74,3	92,2			46,6
Rendimento do SBR2, %	70,0	89,1			55,2

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.5 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 02/02/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 02 - 02 - Saída TQF	0,64	0,29	1,20	< 0,3	110,0
SBR1 - 02 - 03 – Clarificado	0,18	0,026	0,84	< 0,3	87,0
SBR2 - 02 - 03 – Clarificado	0,17	0,03	0,80	< 0,3	79,0
Rendimento do SBR1, %	71,9	91,0			20,9
Rendimento do SBR2, %	73,4	90,0			28,2

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.6 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 08/02/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 02 - 08 - Saída TQF	1,70	0,95	0,97	0,3	150,0
SBR1 - 02 - 09 – Clarificado	0,51	0,160	0,49	< 0,3	140,0
SBR2 - 02 - 09 – Clarificado	0,56	0,13	0,51	< 0,3	130,0
Rendimento do SBR1, %	70,0	83,2			6,7
Rendimento do SBR2, %	67,1	86,3			13,3

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.7 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 09/02/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 02 - 08 - Saída TQF	1,70	0,95	0,97	0,3	150,0
SBR1 - 02 - 10 – Clarificado	0,58	0,200	0,38	< 0,3	120,0
SBR2 - 02 - 10 – Clarificado	0,67	0,25	< 0,3	< 0,3	120,0
Rendimento do SBR1, %	65,9	78,9			20,0
Rendimento do SBR2, %	60,6	73,7			20,0

Nota: Análises realizadas no CEA – Centro de Estudos de Águas do Instituto Superior de Engenharia.

Tabela D.8 – Rendimento SBR no 2º ciclo do dia 20/02/2022

Descrição	CQO g/L O ₂	CBO ₅ g/L O ₂	Fósforo total mg/L P	Fósforo Reativo mg/L P	Azoto Total mg/L N
ALSBR - 02 - 21 - Saída TQF	1,1	0,43	0,47	< 0,3	89,0
SBR1 - 02 - 21 – Clarificado	0,31	0,086	0,75	< 0,3	72,0
SBR2 - 02 - 21 – Clarificado	0,35	0,10	0,55	< 0,3	72,0
Rendimento do SBR1, %	71,8	80,0			19,1
Rendimento do SBR2, %	68,2	76,7			19,1

Anexo E – Resumo processo de tratamento

Nas tabelas E.1 a E.3 são apresentados os quadros resumo parâmetros de projeto para cada um dos processos de tratamento

Tabela E.1 – Resumo dos parâmetros do TFQ

Parâmetros de projeto	Unidade	Valor
Capacidade de armazenamento de efluente	m ³	10 + 10
Caudal mínimo	m ³ /d	6
Caudal máximo	m ³ /d	12
Coagulante – cloreto férrico	ml/L	(1)
Floculante -	ml/L	(1)
Neutralizador – cal	ml/L	(1)
Volume reator coagulação	L	100
Tempo de retenção no reator de coagulação	min	(2)
Volume decantador	L	400
Unidade desidratação	Un	2

(1) Quantidade depende dos resultados do *Jar Test*

(2) Varia em função do caudal

Tabela E.2 – Resumo dos parâmetros do SBR

Parâmetros de projeto	Unidade	Valor
Carga de CBO ₅ média	kg /d O ₂	8,7
Carga de Azoto Total	kg /d N	0,79
Número de reatores	Número	1
Tempo de enchimento	h	1
Tempo de arejamento	h	7
Tempo de sedimentação	h	3
Tempo de extração	h	1
Tempo de ciclo	h	12
Número de ciclos	Ciclos/d	2
TRS total	d	20
Volume do reator	m ³	15
Volume enchimento/ciclo	m ³	6
Volume enchimento/volume do reator	Fração	40%
Profundidade de decantação	m	1,27
Altura útil	m	3,18
Diâmetro	m	2,45
Altura total	m	3,38
SSLM	g/m ³	4000
Caudal de bombeamento do clarificado	L/min	120
Produção de lamas	kg SST/d	1,0
Produção observada	kg SST/Kg CBO	0,12
Volume de lamas sedimentadas a extrair	L/semana	1120
Quantidade média de oxigénio por reator/ciclo	kg/Ciclo	79,6
Quantidade média de Ar	m ³ Ar/h	45,1
Nº Difusores	un	12

Tabela E.3 – Resumo dos parâmetros do leito de macrófitas

Parâmetros de projeto	Unidade	Valor
1 unidade		
Volume leito	m ³	2,8
Porosidade do material filtrante	%	50
Caudal médio afluente (Q _m)	m ³ /d	0,350
Tempo de retenção	d	4
Caudal diário	m ³ /d	4,3
Nº de unidades	un	13

Anexo F – Recolha restos de produtos

Na figura F.1 apresenta-se a estrutura para a recolha dos restos de produtos dos IBC.



Figura F.1 – Recolha restos IBC