



Análise do desempenho do digestor anaeróbio de lamas da ETAR do Sousa

MARIANA PRAZERES DE BABO

julho de 2022



Análise do desempenho do digestor anaeróbio de lamas da ETAR do Sousa

Dissertação de Mestrado em Engenharia Química

Julho 2022

AUTOR

Mariana Prazeres de Babo

ORIENTAÇÃO

Eng.^a Diana Duarte – Águas do Norte

Eng.^a Sónia Figueiredo – ISEP

Eng.^a Olga Freitas – ISEP

EMPRESA



AGRADECIMENTOS

Chegou o momento de agradecer a todos aqueles que fizeram parte deste percurso, onde a resiliência foi a minha maior aliada.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à empresa Águas do Norte por me ter acolhido neste estágio e, em especial, à Eng^a Diana Duarte por tudo o que me ensinou e, acima de tudo, por se mostrar sempre disponível quando precisei.

Agradeço também às minhas orientadoras do ISEP, Eng^a Sónia Figueiredo e Eng^a Olga Freitas, por acreditarem no meu trabalho e me mostrarem que sempre posso melhorar.

Ao ISEP, a minha segunda casa, e a todos os seus docentes agradeço por me acolherem desde o primeiro dia e por me transmitirem os conhecimentos necessários para alcançar o sucesso.

Aos meus pais e ao meu irmão agradeço todo o apoio ao longo da minha vida, por serem o meu pilar constante e por nunca me deixarem desistir dos meus sonhos. Aos meus avós e madrinha, obrigada por serem um exemplo de luta e força.

Ao Fábio, por ser o melhor namorado e amigo, pela paciência, pelo companheirismo e por me incentivar a correr atrás de tudo o que sonho.

À Catarina, pela amizade que nos une, por ser a minha luz neste percurso que partilhamos. À Inês, que me acompanhou desde o primeiro dia e que é casa. Aos meus amigos, a minha segunda família, por me mostrarem que nunca estou sozinha.

Obrigada a todos vocês!

RESUMO

O estágio curricular realizado na Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) do Sousa, no âmbito da dissertação de Mestrado no ramo de Tecnologias de Proteção Ambiental, do curso Engenharia Química, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, teve a duração de setembro de 2021 a junho de 2022.

O trabalho desenvolvido teve como objetivos principais a compreensão do funcionamento de uma ETAR, os objetivos de qualidade da água residual tratada, referente aos vários parâmetros de controlo analítico e a sua influência direta ou indireta nos processos da ETAR e, também a determinação experimental de alguns parâmetros analíticos.

O ponto fulcral deste estágio baseou-se no controlo do processo de digestão anaeróbia, e consequente produção de biogás, bem como a análise do seu desempenho após a adição de um resíduo rico em gorduras proveniente da indústria alimentar.

Inicialmente, realizou-se a caracterização das diferentes cargas de resíduo rico em gorduras adicionadas ao digestor anaeróbio ao longo do estudo, relativamente aos seguintes parâmetros: quantidade alimentada ao digestor anaeróbio, pH, razão SSV/SST, razão C/N e razão AGV/Alcalinidade. A quantidade de resíduo face ao total alimentado apresentou um valor médio de 19%. O pH das cargas alimentadas manteve-se num valor médio de 6,2, que se encontra abaixo da gama ótima prevista (6,5 a 7,5). As gorduras alimentadas continham uma razão SSV/SST média de 79%, superior à gama ótima (55 a 70%) e uma razão C/N média de 66:1, valor este muito superior à razão ótima prevista (25:1). A razão AGV/Alcalinidade apresentou um valor médio de 1,20 mg CH₃COOH/mg CaCO₃, que se mostrou bastante elevado face ao valor limite máximo (0,3 mg CH₃COOH/mg CaCO₃).

Posteriormente, avaliou-se a influência dos parâmetros operatórios (pH, temperatura, razão AGV/Alcalinidade e tempo de retenção hidráulico) no processo de co-digestão anaeróbia. O pH das lamas após digestão apresentou um valor médio de 7,5, pelo que o digestor permaneceu na gama ótima de pH. A temperatura permaneceu na gama ótima de regime mesofílico (25 a 40 °C), apresentando um valor médio de 40,3 °C. As lamas digeridas apresentaram uma grande estabilidade, visto que a razão AGV/Alcalinidade média foi de 0,10 mg CH₃COOH/mg CaCO₃, valor abaixo do limite

máximo previsto para esta razão. O tempo de retenção hidráulico no digestor anaeróbio foi de 34 dias, sendo superior ao intervalo previsto na literatura (15 a 20 dias).

A produção de biogás e de energia foi avaliada antes (entre novembro e dezembro de 2021) e após (de janeiro a maio de 2022) a adição do resíduo rico em gorduras no processo de co-digestão anaeróbia. A produção média de biogás passou de 737,7 para 1388 m³/dia, representando um aumento significativo de 88%. Por sua vez, a energia produzida média subiu de 645 para 2049 kWh/dia, o que mostra um aumento de 218%. Neste sentido, a autossuficiência da ETAR do Sousa evoluiu positivamente, de valores médios de 17,5 para 43,4 %.

Após este estudo, conclui-se que o resíduo rico em gorduras adicionado ao digestor apresentou vantagens para o processo de digestão anaeróbia, com consequente aumento da produção de biogás e energia.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia; Biogás, Energia, Gorduras, Autossuficiência.

ABSTRACT

The curricular internship took place at Sousa Wastewater Treatment Plant (WWTP), from September 2021 to June 2022, within the scope of the dissertation of the Master's Degree in Chemical Engineering in the field of Environmental Protection Technologies at ISEP – School of Engineering.

The work developed had as main goals the understanding of the WWTP processes, the quality standards of the treated wastewater, regarding all the analytic control parameters and how they influence the WWTP processes, as well as the experimental execution of some analytical methods.

The main focus of the internship was the control of the anaerobic digestion process, and consequent production of biogas, analyzing the parameters that influence it, as well as the analysis of the performance of the anaerobic digester after the addition of a residue rich in fats from the food industry.

Initially, the characterization of the different loads of residue rich in fats was carried out. These loads were added to the anaerobic digester during the study and the characterization was done regarding the following parameters: amount fed to the anaerobic digester, pH, SSV/SST ratio, C/N ratio and AGV/Alkalinity ratio. The percentage of residue, compared to the total amount fed, had an average value of 19%. The pH of the fat loads presented an average value of 6,2, which is below the optimal range (6,5 to 7,5). The fats also had an average SSV/SST ratio of 79%, which was above the optimal range (55 to 70%), and an average C/N ratio of 66:1, which was much higher than the estimated optimal ratio (25:1). The AGV/Alkalinity ratio had an average value of 1,20 mg CH₃COOH/mg CaCO₃, which was quite high compared to the maximum limit value (0,3 CH₃COOH/mg CaCO₃).

Then, the influence of operative parameters (pH, temperature, AGV/Alkalinity ratio and hydraulic retention time) on the anaerobic co-digestion process was evaluated. The sludge's pH after digestion averaged at 7,5, thus, the digester remained in the optimal pH range. The temperature also stabilized in the optimal range of the mesophilic regime (25 to 40 °C), presenting an average value of 40,3 °C. The digested sludge also showed great stability, since the average AGV/Alkalinity ratio was 0,10 CH₃COOH/mg CaCO₃, a value below the maximum predicted limit. The hydraulic

retention time on the anaerobic digester was 34 days, which is higher than the period predicted in the literature (15 to 20 days).

The biogas and energy production were evaluated before (November to December 2021) and after (January to May 2022) the addition of the residue rich in fats to the anaerobic co-digestion process. The average production of biogas had a significant increase of 88%, from 737,7 to 1388 m³. Also the energy production increased from 645 to 2049 kWh, representing an improvement of 218%. Thus, the self-sufficiency of the Sousa WWTP had a positive evolution, on average, from 17,5 to 434%.

From this study it is possible to conclude that the residue rich in fats, added to the digester, brought advantages to the anaerobic co-digestion process, with consequent increase of the biogas and energy production.

Keywords: Anaerobic Digestion; Biogas, Energy, Fats, Self-sufficiency.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e objetivos	1
1.2. Organização da dissertação	1
Capítulo 2: Descrição da ETAR do Sousa	3
2.1. Descrição da empresa.....	3
2.2. Esquema de funcionamento da ETAR	3
Capítulo 3: Tratamento da fase líquida	7
3.1. Tratamento preliminar.....	7
3.2. Tratamento primário.....	10
3.3. Tratamento secundário	11
3.3.1 Reator biológico	11
3.3.2 Decantação secundária	13
3.4. Reutilização da água residual tratada	13
3.5. Objetivos de tratamento	14
3.5.1 Efluente para descarga no meio recetor	14
3.5.2. Água de serviço a reutilizar para fins não potáveis.....	14
Capítulo 4: Tratamento da fase sólida.....	15
4.1. Espessamento gravítico de lamas primárias.....	15
4.2. Espessamento mecânico de lamas secundárias	16
4.3. Tanque de lamas mistas.....	17
4.4. Digestão anaeróbia de lamas	17
4.5. Desidratação de lamas	20
4.6. Objetivos de tratamento da lama desidratada.....	22
Capítulo 5: Digestão anaeróbia e co-digestão	23
5.1 Etapas do processo de digestão anaeróbia.....	23
5.2 Parâmetros que influenciam o processo	25
Capítulo 6: Controlo analítico	29
Capítulo 7: Resultados e discussão	31
7.1 Caracterização do resíduo rico em gorduras	31
7.1.1. Quantidade de resíduo alimentada ao digestor.....	31
7.1.2. pH do resíduo	32
7.1.3. Relação de sólidos do resíduo	32
7.1.4. Razão C/N do resíduo	33

7.1.5. Razão AGV/alcalinidade do resíduo	35
7.2 Avaliação da influência dos parâmetros operatórios na co-digestão anaeróbia	36
7.2.1. pH.....	36
7.2.2. Temperatura	37
7.2.3. Ácidos gordos voláteis e alcalinidade	38
7.2.4. Tempo de retenção hidráulico	39
7.3 Produção de biogás e energia	40
7.3.1. Produção de biogás.....	40
7.3.2. Produção de energia	41
7.3.3. Autossuficiência	42
Capítulo 8: Conclusões	43
Referências bibliográficas	45
Anexo A: Controlo analítico	47
A.1. Determinação analítica do pH	47
A.2. Determinação de sólidos suspensos totais, sólidos suspensos voláteis e sólidos suspensos fixos.....	48
A.3. Determinação de sólidos totais e sólidos voláteis	50
A.4. Determinação da matéria seca e matéria volátil	50
A.5. Determinação da alcalinidade e ácidos gordos voláteis	51
A.6. Determinação da carência química de oxigénio.....	52
A.7. Determinação da carência bioquímica de oxigénio	54
A.8. Determinação de azoto amoniacal.....	55
A.9. Determinação de azoto total	55
A.10. Determinação de fósforo total	56
A.11. Determinação de nitratos.....	56
Anexo B: Dados relativos ao resíduo rico em gorduras.....	57
Anexo C: Dados do funcionamento do digestor anaeróbio.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de funcionamento da ETAR do Sousa.	4
Figura 3.1: Parafusos de Arquimedes-elevação inicial.	7
Figura 3.2: Contentores de recolha de sólidos gradados e tamisados.	8
Figura 3.3: Órgãos de desarenamento e desengorduramento.	9
Figura 3.4: Reator biológico (valas de oxidação).	11
Figura 3.5: Decantadores secundários.	13
Figura 4.1: Espessador gravítico de lamas primárias.	15
Figura 4.2: Tambores de espessamento mecânico de lamas em excesso.	16
Figura 4.3: Digestor anaeróbio.	18
Figura 4.4: Gasómetro.	19
Figura 4.5: Tocha de queima.	20
Figura 4.6: Centrífuga.	21
Figura 4.7: Silo de armazenamento de lamas.	21
Figura 5.1: Esquema representativo do processo de digestão anaeróbia (Adaptado de [11]).	23
Figura 7.1: Percentagem de resíduo face ao total alimentado ao digestor.	31
Figura 7.2: pH relativo ao resíduo na alimentação ao digestor.	32
Figura 7.3: Evolução da razão SSV/SST do resíduo na alimentação.	33
Figura 7.4: Razão C/N do resíduo na alimentação.	34
Figura 7.5: Relação de nitrogénio amoniacal e nitratos do resíduo na alimentação.	34
Figura 7.6: Razão AGV/Alcalinidade do resíduo na alimentação.	35
Figura 7.7: Comparação do pH na alimentação e após co-digestão anaeróbia.	36
Figura 7.8: Temperatura das lamas digeridas.	37
Figura 7.9: Razão AGV/Alcalinidade das lamas digeridas.	38
Figura 7.10: Comparação da razão AGV/Alcalinidade na alimentação e após co-digestão anaeróbia.	39
Figura 7.11: Tempo de retenção hidráulico das lamas no digestor.	40
Figura 7.12: Produção de biogás na ETAR do Sousa.	41
Figura 7.13: Produção de energia na ETAR do Sousa.	41
Figura 7.14: Autossuficiência da ETAR do Sousa.	42
Figura A.1: Potenciómetro.	48
Figura A.2: Escala de pH de <i>Sorensen</i> (1909).	48
Figura A.3: Filtração por vácuo.	49
Figura A.4: Centrífuga.	52
Figura A.5: Termoreator.	53
Figura A.6: Espectrofotómetro.	53
Figura A.7: BODTrak II.	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores limite de emissão (VLE) da água residual tratada de acordo com a licença de descarga.	14
Tabela 3.2: Valores limite de emissão para a água de serviço.	14
Tabela 6.1: Controlo analítico referente à linha líquida.	29
Tabela 6.2: Controlo analítico referente à linha sólida.	30
Tabela B.1: Dados relativos à alimentação ao digestor.....	57
Tabela B.2: Dados relativos à alimentação ao digestor.....	58
Tabela C.1: Dados Gerais do Funcionamento da ETAR do Sousa.	59
Tabela C.2: Valores mínimos médios e máximos dos resultados inerentes à digestão anaeróbia.	64

NOMENCLATURA

AGV - Ácidos Gordos Voláteis

AdP - Águas de Portugal

Alc - Alcalinidade

N_{Total} - Azoto Total

PMB - Azul de Fosfomolibdénio

CBO₅ - Carência Bioquímica de Oxigénio (ao fim de 5 dias)

CQO - Carência Química de Oxigénio

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

P_{Total} - Fósforo Total

MS - Matéria Seca

MV - Matéria Volátil

NMP - Número mais provável

SSF - Sólidos Suspensos Fixos

SST - Sólidos Suspensos Totais

SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

ST - Sólidos Totais

SV - Sólidos Voláteis

TRH - Tempo de Retenção Hidráulico

UV - Ultravioleta

VLE - Valor Limite de Emissão

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O estágio curricular realizado na Estação de Tratamento de Águas Residuais do Sousa, no âmbito da dissertação de Mestrado no ramo de Tecnologias de Proteção Ambiental do curso de Engenharia Química, teve a duração de um ano letivo, onde foi possível aplicar em ambiente empresarial os conhecimentos adquiridos ao longo do mestrado.

Este estágio teve como objetivos principais a compreensão do funcionamento de uma ETAR, tendo em vista a qualidade da água residual tratada, conhecimento dos parâmetros de controlo analítico e a sua influência direta ou indireta nos processos da ETAR, assim como a determinação experimental de alguns deles.

O ponto fulcral deste estágio baseou-se no controlo da digestão anaeróbia e consequente produção de biogás, analisando os parâmetros que influenciam o processo, tais como pH, temperatura, razão AGV/alcalinidade e tempo de retenção hidráulico.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada por capítulos.

O Capítulo 1 explicita os objetivos da dissertação e descreve brevemente a sua organização.

O Capítulo 2 apresenta uma breve descrição da empresa, bem como o esquema de funcionamento da ETAR do Sousa e os pontos de amostragem nas diferentes etapas de tratamento.

Os Capítulos 3 e 4 descrevem de forma detalhada os processos de tratamento das fases líquida e sólida, respetivamente.

No Capítulo 5 é aprofundado o processo de digestão anaeróbia e co-digestão e são apresentadas informações sobre o resíduo rico em gorduras adicionado na co-digestão.

No Capítulo 6 são descritos os parâmetros analíticos avaliados, sendo apresentados os resultados obtidos e a respectiva discussão no Capítulo 7.

Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões desta dissertação e sugestões para trabalho futuro.

CAPÍTULO 2: DESCRIÇÃO DA ETAR DO SOUSA

2.1. DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A ETAR do Sousa pertence à empresa Águas do Norte, que por sua vez faz parte do Grupo Águas de Portugal (AdP). O Grupo AdP foi criado a 29 de setembro de 1993, e desenvolve uma função estruturante no setor do ambiente em Portugal, com atividade nos domínios do abastecimento de água e do saneamento de águas residuais. Através das suas empresas, o Grupo AdP tem uma presença em todo o País, de Norte a Sul, prestando serviços aos Municípios, que são simultaneamente acionistas das empresas gestoras dos sistemas multimunicipais, e servindo as populações através de sistemas municipais de abastecimento de água e de saneamento [1].

A Águas do Norte é uma entidade gestora do sistema multimunicipal em “alta” que tem como função a captação, tratamento e abastecimento de água ao público, de uma forma eficiente, inovadora e sustentável, que visa a melhoria da qualidade de vida da região pela qual é abrangida [1].

A ETAR do Sousa faz parte do concelho de Lousada e está projetada para servir cerca de 89 913 habitantes e para tratar um caudal médio de cerca de 13 855 m³/dia [2].

2.2. ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA ETAR

A Estação de Tratamento de Águas Residuais do Sousa engloba o tratamento das fases líquida e sólida. O esquema de tratamento da ETAR representado na Figura 2.1 permite dar uma melhor perceção das diferentes etapas de tratamento [2].

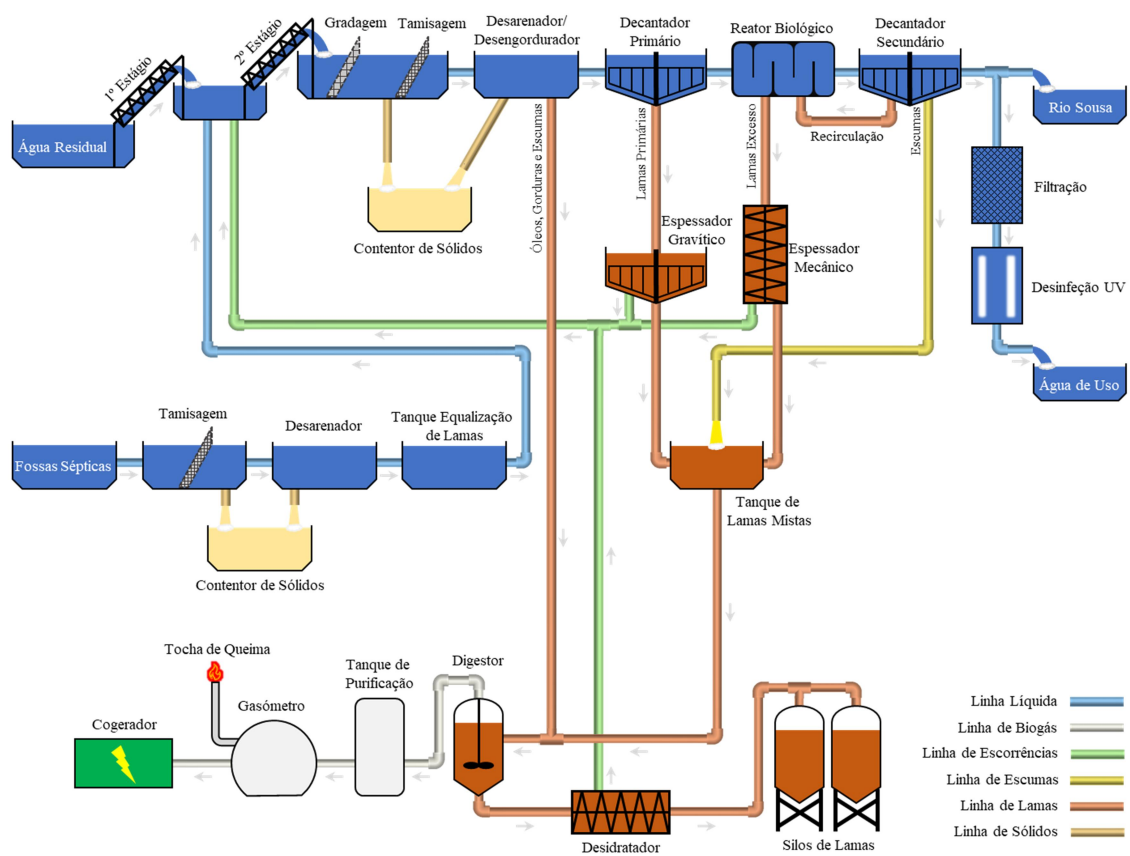


Figura 2.1: Esquema de funcionamento da ETAR do Sousa.

O tratamento da **Fase Líquida**, descrito detalhadamente no Capítulo 3, engloba os tratamentos preliminar, primário e secundário, cujas etapas se apresentam de seguida [2].

O tratamento preliminar inclui:

- elevação inicial da água residual bruta por parafusos de Arquimedes;
- gradagem grossa mecânica;
- tamisagem em tamisadores de grelha rotativos;
- tratamento preliminar alternativo assegurado por uma grelha manual;
- tamisagem e desarenamento de lamas provenientes de fossas sépticas;
- desarenamento e desengorduramento.

O tratamento primário inclui:

- decantação primária.

O tratamento secundário inclui:

- tratamento num reator biológico;
- decantação secundária;
- reutilização do efluente tratado, com adicional filtração e desinfecção por radiação ultravioleta (UV).

O tratamento da **Fase Sólida**, descrito detalhadamente no Capítulo 4, engloba as seguintes etapas [2]:

- separação das gorduras provenientes do tratamento primário e envio para o digestor;
- espessamento gravítico das lamas primárias;
- espessamento mecânico de lamas biológicas em excesso;
- mistura das lamas primárias e biológicas espessadas no tanque de lamas mistas;
- digestão anaeróbia das lamas mistas para produção de biogás;
- queima do biogás num co-gerador para produção de energia eléctrica e térmica (utilizada pelo permutador de calor para aquecimento das lamas do digestor anaeróbio);
- desidratação mecânica das lamas digeridas em centrífuga;
- armazenamento das lamas desidratadas em silos;
- retorno das escorrências, provenientes dos espessamentos gravítico e mecânico e da desidratação, ao início do tratamento da fase líquida.

CAPÍTULO 3: TRATAMENTO DA FASE LÍQUIDA

As águas residuais que chegam à ETAR do Sousa sofrem um tratamento da fase líquida que compreende várias etapas, nomeadamente, os tratamentos preliminar, primário e secundário, de forma a permitir a reutilização do efluente final.

3.1. TRATAMENTO PRELIMINAR

Na entrada da ETAR, numa primeira instância, as águas residuais são elevadas com o auxílio de parafusos de Arquimedes. Esta elevação é realizada em dois estágios, cada um constituído por três parafusos de Arquimedes (Figura 3.1), sendo um deles reserva mecânica, e na qual cada parafuso está capacitado para elevar $589 \text{ m}^3/\text{h}$ até uma cota máxima de 17,7 m, em relação à soleira, que permite o escoamento gravítico para os órgãos de tratamento seguintes [2].



Figura 3.1: Parafusos de Arquimedes-elevação inicial.

Posteriormente, realiza-se o pré-tratamento que se baseia em operações inteiramente físicas com o objetivo de remover a matéria sólida mais grosseira da água residual, para que não interfira em processos posteriores, evitando, por exemplo, problemas relacionados com entupimentos de tubagens [3,4].

Este tratamento engloba duas linhas de **gradagem** grossa mecânica (40 mm de espaçamento), para retenção dos sólidos em suspensão mais grosseiros, com o intuito de proteger o equipamento de gradagem fina. Posteriormente, é realizada uma gradagem fina ou **tamisagem** por tamisadores de grelhas rotativo (3 mm de espaçamento), que possuem um sistema de transporte de resíduos, compactação e lavagem integrado, sendo retirados os restantes sólidos de menor dimensão. Deste modo, a água residual sofre uma filtração inicial, depois da qual os sólidos provenientes da gradagem e tamisagem são raspados através de uma escova raspadora, encaminhando-os para um parafuso transportador. Nesta fase do tratamento, os gradados são lavados, originando escorrências que retornam ao início do tratamento. De seguida, é realizada a desidratação e compactação destes sólidos até 25 a 30% de matéria seca (MS), os quais são posteriormente transportados por um tapete transportador para os contentores adequados (Figura 3.2) com capacidade unitária de 5 m³, localizados no mesmo edifício, que são, mais tarde, encaminhados para aterro [2].



Figura 3.2: Contentores de recolha de sólidos gradados e tamisados.

Na impossibilidade de realização da tamisagem, existe a possibilidade de efetuar uma gradagem manual (25 mm de espaçamento) retirando apenas os sólidos mais grosseiros, evitando assim a sua passagem para os tratamentos posteriores. As operações de desarenamento e desgorduramento são efetuadas em dois órgãos de formato longitudinal (Figura 3.3), onde ocorrem simultaneamente os processos de desarenamento, na zona mais profunda (largura de 1,65 m) e desgorduramento, na zona mais próxima da superfície (largura de 1,0 m) [2].



Figura 3.3: Órgãos de desarenamento e desengorduramento.

Numa primeira fase, ocorre o **desarenamento**, onde a água residual fica sujeita a um fluxo descendente, o que força a acumulação das areias no fundo, por ação da gravidade. Esta etapa necessita de arejamento, com auxílio de arejadores submersíveis do tipo “aeroflott”, tendo como finalidade a remoção da matéria orgânica envolvida nos grãos de areia, a qual flutua e se acumula à superfície, passando para a zona de desengorduramento. De seguida, a ponte raspadora remove as areias, que são extraídas através de um sistema de *air-lift* para o classificador de areias, com uma capacidade de 7 m^3 . A remoção da matéria orgânica associada às areias otimiza o funcionamento do classificador de areias, pois origina areias praticamente isentas de matéria orgânica, o que significa que as mesmas apresentam baixa emissão de maus odores [3,4]. A forma do classificador provoca um escoamento laminar propício à decantação. Assim, os sólidos depositam-se no fundo e são recolhidos com o auxílio de um parafuso sem fim, que transporta os resíduos para o contentor de recolha [2].

Numa segunda etapa, ocorre o **desengorduramento**, provido também de arejamento que tem como função a remoção de óleos e gorduras, dado que proporcionam a união de duas correntes ascendentes, de água e ar, permitindo o aprisionamento das gorduras pelas bolhas de ar, favorecendo a sua flotação e ascensão à superfície desta zona [2,4]. Os óleos, gorduras e espumas resultantes deste processo, são removidos por pontes raspadores superficiais e conduzidos graviticamente para o poço de recolha, do qual são encaminhados diretamente para o digestor, especificamente, para a linha de recirculação de lamas aquecidas. No mesmo edifício existe ainda um sistema de injeção de água de serviço para lavagem da caleira de gorduras, assim como

um triturador a montante do transportador de gorduras, que são de extrema importância para proteger os equipamentos e evitar a colmatção de tubagens [2].

Existe também, nesta estação de tratamento de águas residuais, um sistema compacto de receção e pré-tratamento de lamas de fossas sépticas, onde é realizado um tratamento preliminar, que engloba uma tamisação com uma malha de 6 mm de espaçamento e um desarenador, que tem como função reter as areias, que posteriormente são conduzidas por um parafuso classificador para um contentor de resíduos adequado, com uma capacidade unitária de $1,1 \text{ m}^3$ [2].

O efluente tamisado é encaminhado para o tanque de armazenamento e equalização de lamas, com um volume útil de 66 m^3 , a partir do qual é realizada uma alimentação gradual ao 2º estágio dos parafusos de Arquimedes. Esta estação compacta encontra-se capacitada para tratar $80 \text{ m}^3/\text{h}$ [2].

3.2. TRATAMENTO PRIMÁRIO

Logo após o pré-tratamento, inicia-se o tratamento primário, onde ocorre o processo de decantação primária.

A **decantação primária** decorre em dois decantadores quadrados, capacitados para tratar $12 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, constituídos por módulos de lamelas. Nesta etapa, a água residual é separada dos sólidos sedimentáveis, através da força da gravidade. As lamelas, células hexagonais em PVC com uma inclinação de 60° e com espaçamento de 78 mm entre si, têm como função o aumento da área de decantação, diminuindo a área de implantação necessária para se obter a mesma eficiência de sedimentação [2].

Desta última etapa, resultam lamas primárias que são evacuadas por meio de pontes raspadoras de fundo, conduzindo-as para as tremonhas de recolha e posteriormente, para o espessador gravítico. Após esta etapa resulta uma eficiência de remoção mínima de 50 a 55% dos sólidos suspensos totais (SST), 25% da carência química e bioquímica de oxigénio, 9% de azoto e 11% de fósforo [2].

A água residual, após o tratamento preliminar e tratamento primário, segue para o tratamento secundário ou biológico.

3.3. TRATAMENTO SECUNDÁRIO

3.3.1 REATOR BIOLÓGICO

Após o tratamento primário, as águas residuais são alimentadas a 2 reatores biológicos de lamas ativadas, valas de oxidação do tipo *Carrousel*® 2000, como mostra a Figura 3.4 [2].



Figura 3.4: Reator biológico (valas de oxidação).

Cada reator biológico é composto por zonas distintas, que têm como finalidade a remoção da matéria orgânica da água residual, tais como o seletor, o tanque de pré-desnitrificação e o tanque de arejamento [2].

✓ Seletor

A montante do reator biológico está incorporado um tanque de contacto ou seletor, que opera em condições anóxicas e no qual se procede à seleção da biomassa que originará uma boa decantabilidade das lamas, controlando, consequentemente, a proliferação das bactérias filamentosas que, em excesso, poderiam dificultar o processo de sedimentação [2,4].

Neste tanque é também alimentada uma fração controlada de lamas de recirculação que entra em contacto com a água residual, num tempo de retenção hidráulico de 15 minutos. O caudal de lamas recirculadas alimentado é variável de acordo com a concentração de carência química de oxigénio (CQO) presente na água residual e a concentração das lamas ativadas em recirculação [2].

✓ Tanque de pré-desnitrificação

Integrado no reator biológico, existe ainda um tanque de pré-desnitrificação, onde é efetuada a mistura/homogeneização da água residual com a corrente de recirculação de nitratos proveniente da zona arejada do reator. Nesta fase, são criadas condições propícias para a conversão biológica dos nitratos em azoto gasoso, pelo processo conhecido como **desnitrificação**, que ocorre nas zonas anóxicas caracterizadas pela escassez em oxigénio dissolvido. A desnitrificação é um passo essencial no tratamento biológico para o controlo da concentração de azoto na água residual, dado que um excesso deste nutriente pode contribuir para a eutrofização do meio recetor [2,4].

Este tanque possui um volume de $1\,320\text{ m}^3$, que corresponde a 20% do reator biológico, excetuando o seletor. A configuração do mesmo, em circuito orbital, permite que a recirculação interna dos nitratos seja assegurada pelo próprio circuito, sem que exista necessidade de bombas. O caudal de recirculação máximo é de aproximadamente $1\,960\text{ m}^3/\text{h}$ e o tempo de retenção nesta zona é de 40 minutos. É de notar que ambos podem variar de acordo com o teor de nitratos no tanque, que se deverá manter entre 2 e $4\text{ mg N-NO}_3^-/\text{L}$. A título de exemplo, caso seja verificado um aumento deste teor, deverá ser diminuído o caudal de recirculação de nitratos [2].

✓ Tanque de arejamento

Após o tanque de pré-desnitrificação, a mistura de água residual e lamas ativadas atravessa zonas aeróbias e anóxicas do reator biológico do tipo *Carrousel*® 2000, com fluxo orbital. No tanque de arejamento é realizado o processo de conversão biológica de azoto amoniacal a nitratos, o que se designa por **nitrificação**. O arejamento é conseguido com o auxílio de 2 arejadores de superfície de eixo vertical em cada tanque, sendo estes controlados em função da concentração de azoto amoniacal e oxigénio dissolvido no reator biológico. A concentração de lamas ativadas é controlada através da concentração de sólidos em suspensão. Cada tanque possui um volume de $5\,280\text{ m}^3$ e profundidade de 4,0 m, garantindo uma idade mínima das lamas de 14 dias [2].

Desta fase de tratamento, resultam lamas biológicas em excesso, que serão espessadas mecanicamente. A água residual tratada biologicamente é encaminhada para o decantador secundário.

3.3.2 DECANTAÇÃO SECUNDÁRIA

A água residual é enviada do reator biológico para os decantadores secundários (Figura 3.5), para que possa ser clarificada, isto é, separada da lama existente. Em período de maior afluência, o caudal tratado corresponde a 866 m³/h [2].



Figura 3.5: Decantadores secundários.

As lamas que se depositam no fundo dos decantadores são encaminhadas para o centro, através de raspadores que funcionam em contínuo e, posteriormente, para a estação elevatória de lamas secundárias. Nesta etapa, ocorre também formação de escumas na superfície do decantador que são removidas, por meio de um raspador de superfície e enviadas para o tanque de lamas mistas, para posterior digestão anaeróbia. A água residual tratada é, por fim, enviada para o meio recetor ou reutilizada na própria ETAR, devendo satisfazer os valores limite de emissão (VLE) apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respetivamente [2].

3.4. REUTILIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUAL TRATADA

Após todo o processo de tratamento, parte da água residual tratada tem possibilidade de ser utilizada para vários fins, tais como lavagens de pavimentos, contentores e viaturas, regas de espaços verdes da ETAR, entre outros.

Para o efeito, é submetida a um tratamento adicional de filtração (malha de 25 µm) seguida de desinfecção por radiação ultravioleta, que garante um grau de desinfecção

de 100 NMP/100 mL em termos de coliformes fecais. Por fim, é bombeada para o tanque de armazenamento de efluente tratado, que tem de volume útil de 139 m³ [2].

Caso não seja possível o uso desta água, quer pelo seu baixo nível no tanque de armazenamento, quer pela sua qualidade, está previsto o uso de água da rede de abastecimento como alternativa [2].

3.5. OBJETIVOS DE TRATAMENTO

3.5.1 EFLUENTE PARA DESCARGA NO MEIO RECETOR

Sendo o meio recetor do efluente tratado nesta ETAR o Rio Sousa, e de acordo com a legislação em vigor, resultante da conjugação do Decreto-Lei nº 152/97 [5] de 19 de Julho, do Decreto-Lei nº 236/98 [6] de 1 de Agosto e do Decreto-Lei nº 135/2009 [7], é necessário atingir um nível de tratamento compatível com os VLE apresentados na Tabela 3.1. É igualmente importante monitorizar regularmente a qualidade da água do rio a montante e jusante.

Tabela 3.1: Valores limite de emissão (VLE) da água residual tratada de acordo com a licença de descarga.

Parâmetro	Unidade	VLE
CBO ₅	mg O ₂ /L	25
CQO	mg O ₂ /L	125
SST	mg/L	35

3.5.2. ÁGUA DE SERVIÇO A REUTILIZAR PARA FINS NÃO POTÁVEIS

Para além das exigências impostas no efluente para descarga, é necessário considerar ainda as exigências de remoção bacteriológica para a água de serviço, a reutilizar em regas ou lavagens de pavimentos, como apresenta a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores limite de emissão para a água de serviço.

Parâmetro	Unidade	VLE
Coliformes Fecais	NMP/ 100 mL	100

CAPÍTULO 4: TRATAMENTO DA FASE SÓLIDA

As lamas primárias e secundárias (em excesso) provenientes dos vários estágios de tratamento da fase líquida sofrem tratamento e são, posteriormente, aproveitadas para produção de biogás e correspondente valorização energética, e também para fins agrícolas.

4.1. ESPESSAMENTO GRAVÍTICO DE LAMAS PRIMÁRIAS

As lamas primárias oriundas dos decantadores primários, no tratamento da fase líquida, são direcionadas para o espessador gravítico [2] (Figura 4.1).



Figura 4.1: Espessador gravítico de lamas primárias.

Nesta etapa, as lamas sofrem decantação, para remover a água ainda existente do sobrenadante, e acumulam-se no fundo, reunindo-se na zona central do espessador, por ação do raspador de fundo, de seguida são evacuadas e direcionadas para o tanque de lamas mistas. O sobrenadante é encaminhado graviticamente para o circuito de escorrências da obra de entrada. Deste modo, é possível aumentar a concentração das lamas primárias de 1,5 para 6% MS, originando 62,2 m³/d de lamas primárias espessadas e 186,6 m³/d de escorrências de espessamento gravítico [2].

4.2. ESPESAMENTO MECÂNICO DE LAMAS SECUNDÁRIAS

O espessamento de lamas visa a separação das fases sólida e líquida presentes nas lamas, no qual a fase líquida (sobrenadante) é encaminhada para o início do processo de tratamento. Este processo apresenta diversas vantagens, tais como a redução do volume de lamas e consequente aumento da concentração de sólidos [8].

As lamas biológicas em excesso, resultantes do tratamento biológico da fase líquida, são extraídas da estação elevatória de lamas de recirculação, sendo de seguida espessadas em 2 tambores de espessamento mecânico, com capacidade de 30 m³/h, até atingirem 0,7% MS (Figura 4.2) [2].



Figura 4.2: Tambores de espessamento mecânico de lamas em excesso.

Os tambores de espessamento mecânico possuem, à cabeça, um tanque (0,6 m³) onde se adiciona floculante, que proporciona o tempo de contacto e a agitação necessários para garantir uma mistura homogénea entre a lama e o floculante, o qual tem como função auxiliar a formação de flocos, permitindo, assim, uma melhor separação sólido/líquido entre as lamas sólidas e a água. Por sua vez, o floculante é fornecido a uma concentração que depende do caudal de lamas a espessar, que corresponde, no máximo, a 5,0 g Polieletrólito/kg MS. As lamas floculadas são espessadas pelo efeito da gravidade no tambor, constituído por uma estrutura metálica cilíndrica, que se encontra em rotação e proporciona o espessamento da lama, eliminando grande parte da água nela existente. O grau de espessamento das lamas ideal é cerca de 6% MS, que, por sua vez, depende do tipo de floculante e da correta adição

de lamas. É de notar que, admitindo uma eficiência de 95% dos tambores de espessamento mecânico, se consegue uma produção média de lamas em excesso espessadas de cerca de 77 m³/d. Por fim, as lamas em excesso espessadas são descarregadas diretamente no tanque de lamas mistas [2].

Será também importante referir que todas as escorrências provenientes do espessamento serão enviadas por gravidade e integradas no tratamento no 2º estágio da elevação pelos parafusos de Arquimedes, e constituem cerca de 73% do caudal total de escorrências da ETAR, que é de cerca de 1 344 m³/d [2].

4.3. TANQUE DE LAMAS MISTAS

Com vista a melhorar a homogeneidade das lamas à entrada do digestor anaeróbio ou até mesmo na desidratação, as lamas passam inicialmente por um tanque de armazenamento e mistura, designado por tanque de lamas mistas. A este tanque afluem as lamas primárias provenientes do espessador gravítico e as lamas biológicas provenientes dos tambores de espessamento mecânico. Neste tanque, com volume útil de 15 m³, a mistura de lamas acomoda-se durante 1 dia, com agitação contínua [2]. A mistura de lamas é alimentada, em seguida, ao digestor anaeróbio.

4.4. DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LAMAS

A digestão de lamas realiza-se no digestor anaeróbio (Figura 4.3), isto é, na ausência de oxigénio, que recebe as lamas provenientes do tanque de lamas mistas.



Figura 4.3: Digestor anaeróbio.

Este processo realiza-se num único estágio, com volume útil de $2\,145\text{ m}^3$ e em regime mesófilo a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ao qual corresponde um tempo de retenção hidráulico mínimo de 18 dias. A homogeneidade da mistura no interior do digestor é crucial para que este processo ocorra nas melhores condições. Para tal é realizada agitação contínua, por meio de um agitador de eixo vertical, evitando estratificação das lamas e consequente funcionamento desigual do digestor [2].

Neste digestor, ocorrem reações bioquímicas promovidas por diferentes tipos de bactérias, nas quais se destacam as bactérias metanogénicas que produzem o metano [2].

Para que todo este processo ocorra é necessário que se aqueçam as lamas a uma temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, através da sua recirculação e passagem num permutador de calor. A água do permutador é aquecida através do aproveitamento da energia térmica do grupo de cogeração alimentado com o biogás produzido na ETAR, sendo encaminhada para o permutador de calor para aquecimento das lamas [2].

O grupo de cogeração, que funciona com recurso a biogás tem uma produção máxima de energia de $6\text{--}6,4\text{ kWh/m}^3$ de biogás [2].

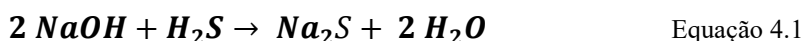
O biogás produzido contém entre 63 e 68% de CH_4 , 30% de CO_2 e vestígios de N_2 , H_2S e água. O biogás é retirado pela cúpula de gás, que se encontra acima do digestor, e de seguida passa por um filtro combinado de cerâmica e cascalho antes da sua purificação. Por um lado, a parte de cascalho constituinte do filtro, tem como função

remover as partículas mais grosseiras do biogás, já a parte de cerâmica pretende reter as partículas mais finas presentes no biogás. O biogás produzido é armazenado num gasómetro semi-esférico de dupla membrana e de baixa pressão (Figura 4.4), com capacidade de 800 m³, no qual a membrana interior é onde está armazenado o biogás e a exterior assegura a manutenção do gasómetro, serve de proteção e cria pressão sob a membrana interior [2].

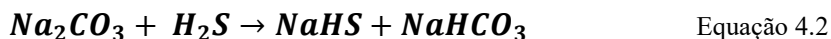


Figura 4.4: Gasómetro.

De seguida, o biogás sofre purificação pelo uso de soluções de hidróxido de sódio, NaOH, que têm como finalidade a diminuição do teor de sulfureto de hidrogénio, H₂S. Este sistema de tratamento consiste na reação da Equação 4.1 [2].



A eficiência da solução de NaOH neste tratamento pode ser aumentada por adição de carbonato de sódio, Na₂CO₃, o qual reage de acordo com a Equação 4.2 [2].



As escorrências originadas neste tratamento são encaminhadas para o sistema de escorrências da ETAR.

No caso de excesso de biogás e impossibilidade do consumo do mesmo, este é queimado numa tocha de queima (Figura 4.5) [2].



Figura 4.5: Tocha de queima.

A digestão anaeróbia permite não só a redução da matéria volátil, tendo como consequência da estabilização das lamas, mas também a redução do volume total de lamas e produção de energia sob a forma de biogás, que se revela uma fonte de energia renovável e inesgotável. Após a digestão, as lamas são encaminhadas para o tanque de armazenamento de lamas digeridas, com um volume útil de 329 m^3 , onde ficam acomodadas durante um período máximo de 3 dias, com agitação contínua. Posteriormente, as lamas são enviadas para desidratação [2].

4.5. DESIDRATAÇÃO DE LAMAS

O processo de desidratação baseia-se na remoção máxima de água possível, com vista à redução de custos e facilidade de transporte, uma vez que num mesmo volume se irá transportar maior quantidade de lamas [2].

Após digestão, as lamas são encaminhadas para desidratação em duas centrífugas (Figura 4.6) que recebe um caudal de $7,0 \text{ m}^3/\text{h}$. É expectável que lamas digeridas que possuíam 4% MS, após desidratação, possuam 26% MS. Para maior eficiência desta etapa, é adicionado um polímero, com uma dosagem máxima de $10,0 \text{ g Polieletrólito/kg MS}$. Às lamas desidratadas é adicionada cal, que visa o aumento do pH (valores próximos de 12), para que a atividade dos microrganismos seja inibida, seja pelo efeito do aumento do pH ou pelo aumento da temperatura, uma vez que se atingem temperaturas que rondam os $50 \text{ }^\circ\text{C}$, consequentemente impedindo assim a decomposição (fermentação) das lamas desidratadas e promovendo o aumento da

concentração de matéria seca (MS) das lamas desidratadas antes de serem encaminhadas para seu o destino final. A dosagem de cal é de cerca de 0,6 kg CaO/kg MS [2].



Figura 4.6: Centrífuga.

Por fim, as lamas são enviadas para silos de armazenamento (Figura 4.7) com capacidade unitária de 55 m³, com posterior despejo em contentores de transporte para compostagem, não sendo, neste caso, realizada a adição de cal [2].



Figura 4.7: Silo de armazenamento de lamas.

4.6. OBJETIVOS DE TRATAMENTO DA LAMA DESIDRATADA

No que diz respeito à linha de lamas, deverão respeitar-se os valores mínimos de siccidade indicados na Tabela 4.1 definidos pela empresa.

Tabela 4.1: Valor mínimo de matéria seca referente às lamas desidratadas.

Parâmetro	Unidade	Valor mínimo
Matéria Seca	%	22

CAPÍTULO 5: DIGESTÃO ANAERÓBIA E CO-DIGESTÃO

5.1 ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia tem vindo a suscitar bastante interesse no que diz respeito ao aproveitamento e tratamento de resíduos e consequente produção de energia. Este processo biológico complexo, realizado na ausência de oxigénio, faz uso de uma diversa comunidade de microrganismos, que interagem entre si, decompondo a matéria orgânica em várias etapas e produzindo biogás, como se mostra no esquema da Figura 5.1 [9].

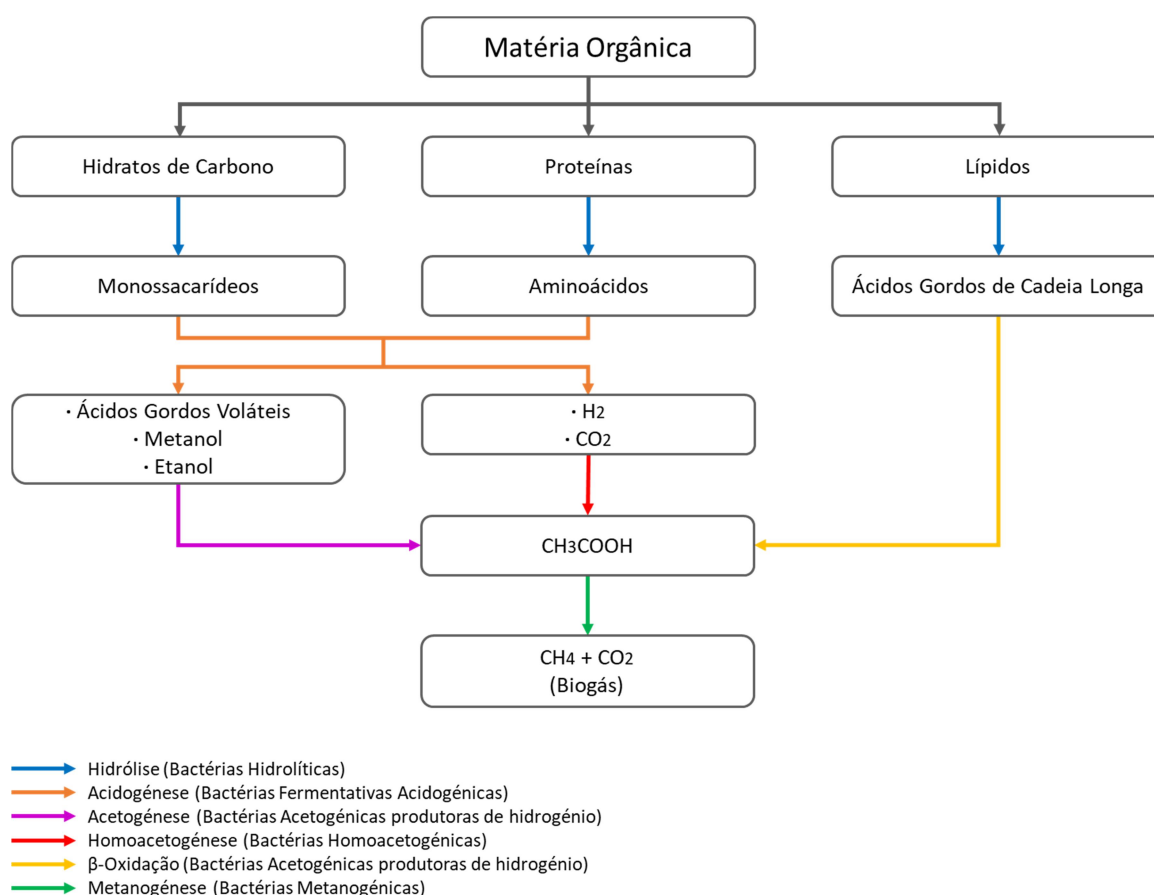


Figura 5.1: Esquema representativo do processo de digestão anaeróbia (Adaptado de [11]).

Numa primeira instância, a matéria orgânica presente nas lamas sofre hidrólise por ação de bactérias hidrolíticas que fazem uso de enzimas extracelulares, transformando as moléculas maiores noutras mais pequenas, como proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos e gorduras em ácidos gordos [9].

De seguida, atuam as bactérias fermentativas acidogénicas que realizam a fermentação ou acidogénese. Os aminoácidos e a glucose provenientes da hidrólise, são, nesta etapa, transportados para o interior da célula, local onde ocorre a fermentação, no qual são convertidos em ácidos gordos voláteis (AGV), álcoois de baixo peso molecular (metanol e etanol), hidrogénio e dióxido de carbono. Uma vez que este tipo de bactérias apresenta uma elevada taxa de reprodução, a população acidogénica representa uma grande parte da comunidade existente no digestor, tornando esta etapa bastante curta. Os microrganismos que efetuam a hidrólise são, normalmente, os mesmos que efetuam a fermentação, como são exemplo as espécies *Lactobacillus* e *Clostridium*, os quais são microrganismos facultativos, o que significa que podem consumir o oxigénio que possa existir no digestor, e, conseqüentemente, proteger os microrganismos anaeróbios estritos [9].

Posteriormente, as bactérias acetogénicas produtoras de hidrogénio utilizam os AGV e álcoois obtidos anteriormente e produzem CH_3COOH . De forma semelhante, as bactérias homoacetogénicas produzem CH_3COOH a partir do H_2 e do CO_2 produzidos. Por sua vez, os ácidos gordos de cadeia longa originados pela hidrólise de lípidos são também convertidos a CH_3COOH através do processo de β -oxidação, realizado pelas bactérias acetogénicas produtoras de hidrogénio, como são o caso da *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Smithella* e *Pelotomaculum* [9,10].

As bactérias metanogénicas acetotróficas, tais como a *Methanosarcina*, que utilizam o CH_3COOH , e as bactérias metanogénicas hidrogenotróficas como a *Methanospirillum* e a *Methanobacterium* que utiliza o H_2 e o CO_2 , finalizam este processo, originando CH_4 e CO_2 , que formam o biogás [8, 9, 11].

É de realçar que as bactérias sintróficas são inibidas pelo hidrogénio, sendo estritamente necessário que a sua pressão parcial se mantenha baixa. Deste modo, existe uma relação de simbiose entre as bactérias sintróficas e as bactérias metanogénicas, onde existe benefício na associação de ambas as espécies. Por um lado, as bactérias sintróficas produzem hidrogénio, mas a acumulação do mesmo torna-se tóxica para este tipo de bactérias, por outro lado, as bactérias metanogénicas utilizam hidrogénio para produção do biogás, alimentando-se do mesmo e protegendo as bactérias sintróficas [9].

5.2 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O PROCESSO

Para que este processo de digestão anaeróbia ocorra com sucesso, existem parâmetros que devem ser controlados, nomeadamente, pH, temperatura, alcalinidade, ácidos gordos voláteis, razão C/N, alimentação da matéria orgânica e tempo de retenção hidráulico [11].

O pH é de extrema importância para a viabilidade dos microrganismos no digestor, uma vez que os mesmos têm preferência por pH próximo do neutro, na gama 6,5-7,5 na escala de *Sorensen*. É de notar que neste processo existe descida deste parâmetro devido à formação de ácidos gordos voláteis [12].

A temperatura é um fator importante que condiciona a produção de biogás. No regime mesofílico, o regime onde se encontra uma maior estabilidade do processo, a temperatura ronda os 25-40 °C. Na ETAR do Sousa, a temperatura é controlada para 40 °C, para favorecer a cinética do processo e obter maior produção de biogás [12].

Se existir acumulação de ácidos gordos voláteis, ocorre uma diminuição do pH, que pode ser contrariada pela capacidade tampão, ou seja, pela alcalinidade, que se for elevada garante uma elevada estabilidade do processo metanogénico. Para que exista estabilidade, a razão entre os ácidos gordos voláteis e a alcalinidade não deve ser superior a 0,3 [12].

A razão C/N relaciona a quantidade de carbono por quantidade de azoto presente na alimentação ao digestor. Enquanto o carbono serve de substrato para a digestão anaeróbia, o azoto tem como função permitir a síntese de proteínas. Este fator é sensível, pois se esta razão for baixa, o azoto irá acumular-se na forma de catião amónio, diminuindo o pH e, consequentemente, a produção de biogás. Caso contrário, se esta razão se mostrar elevada, o azoto esgota-se rapidamente, limitando o desenvolvimento dos microrganismos, o que irá se refletir num decréscimo da produção de biogás. A razão ótima frequentemente referenciada na literatura é de 25:1 [12].

O caudal alimentado ao digestor deve ser equilibrado, dado que uma alimentação excessiva necessita de mais energia para o aquecimento e mais microrganismos para a digestão. Por outro lado, o défice de alimentação origina uma digestão ineficaz ao efeito pretendido [12].

O tempo de retenção hidráulico, está relacionado com o tempo médio de permanência no digestor durante o qual ocorre o consumo de matéria orgânica pelos microrganismos. Se o tempo de retenção hidráulico for elevado, os microrganismos perecem por falta de nutrientes, pelo que o mais aconselhado é um tempo de retenção hidráulico relativamente curto na gama de 15 a 20 dias [3,12]. Assim, torna-se crucial manter o equilíbrio no que diz respeito a este parâmetro.

A digestão anaeróbia possui algumas limitações associadas ao substrato, nomeadamente, alimentação com baixa carga orgânica, concentração elevada ou deficiente de nutrientes, metais pesados, elevada concentração de ácidos gordos de cadeia longa inibidores da atividade metanogénica, entre outros. Assim, a co-digestão anaeróbia pode ajudar a ultrapassar estas situações, apresentando-se como uma solução viável [13].

A co-digestão anaeróbia trata-se de um processo de digestão anaeróbia de dois ou mais substratos em simultâneo de forma a incrementar a produção de biogás, equilibrar a quantidade de nutrientes e humidade no digestor, bem como minimizar efeitos inibidores ou mesmo tóxicos no digestor [14].

A co-digestão é também uma alternativa que promete superar problemas associados à acumulação de ácidos gordos de cadeia longa que formam espumas e são a causa de entupimento, flutuação no digestor e ainda inibição dos microrganismos neste processo [15]. Existem inúmeros substratos que se podem adicionar às lamas que se encontram no digestor, como é o caso dos resíduos ricos em gorduras que será analisado nesta dissertação. De facto, as gorduras contêm uma grande quantidade de lípidos, provenientes de indústrias, resíduos alimentares, entre outros, com um elevado potencial metanogénico em relação às proteínas ou hidratos de carbono. Deste modo, este tipo de substrato promete aumentar significativamente a produção de biogás quando utilizado em co-digestão com as lamas provenientes do tratamento de águas residuais. Os lípidos existentes nas gorduras são então hidrolisados e transformam-se em tri-ésteres de glicerol e em ácidos gordos de cadeia longa [10,16].

Apesar das suas vantagens, podem existir alguns inconvenientes relacionados com o uso deste tipo de substrato, que podem ser físicos ou metabólicos. Os problemas físicos estão inteiramente ligados à acumulação dos ácidos gordos de cadeia longa na biomassa do digestor, o que a torna leve e permite que flutue, ou, quando a carga é

elevada, pode ainda desintegrar os grânulos de biomassa, uma vez que a pH neutro, os ácidos gordos de cadeia longa funcionam como detergentes e baixam a tensão superficial. Deste modo, as bactérias hidrofóbicas não se conseguem agregar e, conseqüentemente, consumir os ácidos gordos de cadeia longa. Os inconvenientes metabólicos estão relacionados com a toxicidade dos ácidos gordos de cadeia longa, que são adsorvidos na membrana celular, interferindo no transporte e proteção da mesma. Contudo, os inconvenientes descritos podem ser contornados com as condições apropriadas, nomeadamente, a proporção de alimentação deste substrato ao digestor, bem como o tempo de retenção hidráulico, concedendo o tempo suficiente à comunidade de microrganismos para decompor os substratos presentes, sem que se esgote o substrato. Desta forma, a alimentação deste tipo de substrato não deve ser contínua, para que exista a possibilidade da aclimatização das bactérias ao substrato que elas decompõem [16].

CAPÍTULO 6: CONTROLO ANALÍTICO

O controlo analítico é um aspeto importante a ter em conta na análise do funcionamento da ETAR, nomeadamente no digestor anaeróbio. Deste modo, durante o período de estágio, foi realizado o controlo analítico de vários parâmetros e amostras referentes a diferentes pontos de amostragem da ETAR do Sousa. As Tabelas 6.1 e 6.2 representam o controlo analítico realizado para a linha líquida e sólida, respetivamente, contendo valores guia e frequência de amostragem para cada parâmetro, de acordo com o tipo de amostra analisada. Os parâmetros analisados foram o pH [17], os sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV) [17,18], os sólidos totais (ST) [17], a matéria seca (MS) e matéria volátil (MV) [17, 18], a alcalinidade (Alc) e ácidos gordos voláteis (AGV) [17,19], carência química de oxigénio (CQO) [17,20,21], a carência bioquímica de oxigénio (CBO₅) [21,22], o azoto total (N) [21,23], o fósforo total (P) [21], os nitratos (NO₃⁻) [21] e o azoto amoniacal (NH₄⁺) [21]. Cada parâmetro analisado encontra-se descrito detalhadamente no Anexo A da presente dissertação.

Tabela 6.1: Controlo analítico referente à linha líquida.

Linha Líquida	Amostra	Parâmetro	Frequência	Valores Guia	Unidades
	Afluente	SST	2 x semana	100-2000	mg/L
		SSV		100-2000	mg/L
		CQO		250-2500	mg O ₂ /L
		CBO ₅		100-1500	mg O ₂ /L
		P		5-25	mg/L
		N		50-350	mg/L
		NH ₄ ⁺		25-250	mg N/L
		NO ₃ ⁻		0,5-15	mg N/L
	Efluente Tratado	SST	2 x semana	3-30	mg/L
		SSV		3-30	mg/L
		CQO		20-100	mg O ₂ /L
		CBO ₅		0-15	mg O ₂ /L
		P		2-10	mg/L
		N		10-80	mg/L
		NH ₄ ⁺		3-80	mg N/L
		NO ₃ ⁻		0,3-5	mg N/L
	Decantador Primário	SST	Semanal	10-550	mg/L
		SSV		10-150	mg/L
		CQO		150-2000	mg/L
	Reator Biológico (Zona Aeróbia)	SST	2 x semana	3000-5500	mg/L
		SSV		3000-4500	mg/L
	Recirculação	ST	2 x semana	9000-15000	g/L
	Reator Biológico (Zona Anóxica)	NH ₄ ⁺	Semanal	0-100	mg N/L
		NO ₃ ⁻		0-5	mg N/L
	Pré-Desnitrificação	NO ₃ ⁻	Semanal	0-1,5	mg N/L

Tabela 6.2: Controle analítico referente à linha sólida.

Linha Sólida	Amostra	Parâmetro	Frequência	Valores Guia	Unidades
	Lamas Primárias	pH	Semanal	5-7,5	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		0,2-4,5	%
		MV		60-95	%
		ST		1500-45000	g/L
	Lamas Primária Espessadas	pH	Semanal	4,5-7,0	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		0,8-9,0	%
		MV		65-90	%
	Sobrenadante do Espessamento Gravítico	pH	Semanal	6,0-8,0	Escala de <i>Sorensen</i>
		SST		100-1500	mg/L
		SSV		100-1500	mg/L
	Lamas Secundárias	pH	Semanal	6,0-7,5	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		1,0-1,5	%
		MV		75-90	%
	Lamas Secundárias Espessadas	pH	Semanal	6,5-7,5	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		2,0-6,5	%
		MV		75-90	%
	Escorrências do Espessamento Mecânico	pH	Semanal	6,5-7,5	Escala de <i>Sorensen</i>
		SST		15-1500	mg/L
		SSV		15-1500	mg/L
	Lamas Mistas	pH	Semanal	5,0-7,0	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		1,0-5,0	%
		MV		70-85	%
		ST		20-50000	g/L
	Lamas Digeridas	pH	2 x semana	7,0-8,0	Escala de <i>Sorensen</i>
		T		35,0-43,5	°C
		MS		0,5-2,50	%
		MV		55-75	%
		ST		10-25000	g/L
		Alc		1500-2500	mg CaCO ₃ /L
		AGV		100-250	mg CH ₃ COOH/L
	Lamas Desidratadas	pH	Semanal	7,5-8,8	Escala de <i>Sorensen</i>
		MS		15-35	%
		MV		60-70	%
	Escorrências da Desidratação	pH	Semanal	7,0-8,5	Escala de <i>Sorensen</i>
		SST		100-1500	mg/L
		SSV		75-1500	mg/L

CAPÍTULO 7: RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO RICO EM GORDURAS

De modo a entender a influência das características da alimentação ao digestor no processo de co-digestão anaeróbia foi realizada a análise de vários parâmetros ao resíduo rico em gorduras alimentado ao digestor. É de extrema importância referir que as cargas alimentadas foram diferentes e por isso o controlo das mesmas tornou-se fulcral. Os dados relativos às características deste resíduo podem ser consultados no Anexo B.

7.1.1. QUANTIDADE DE RESÍDUO ALIMENTADA AO DIGESTOR

Na alimentação ao digestor foi necessário ter em consideração a razão entre a quantidade de resíduo rico em gorduras e as lamas mistas provenientes do processo de tratamento de águas residuais. Apresenta-se na Figura 7.1 a relação percentual da quantidade de gorduras face à alimentação total ao digestor.

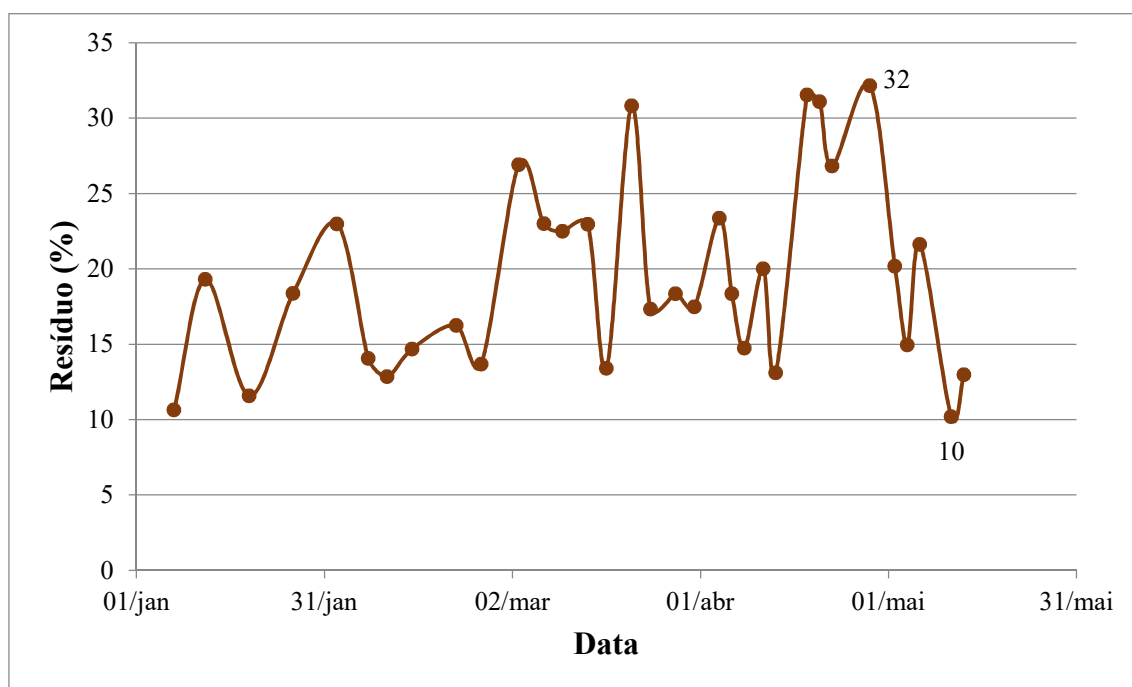


Figura 7.1: Percentagem de resíduo face ao total alimentado ao digestor.

É de notar que a alimentação do resíduo rico em gorduras ao digestor foi realizada de forma escalonada para melhor controlo do processo. Deste modo, em diversas situações, a mesma carga foi dividida em diversas alimentações. A percentagem de resíduo rico em gorduras face ao total alimentado apresentou uma média de 19%, no

entanto, existiram variações entre 10 e 32%, de acordo com o que se mostrou adequado para a produção de biogás.

7.1.2. PH DO RESÍDUO

Uma vez que o pH é um dos parâmetros que mais influencia a co-digestão anaeróbia, foi também realizada a sua análise, apresentando-se os resultados na Figura 7.2.

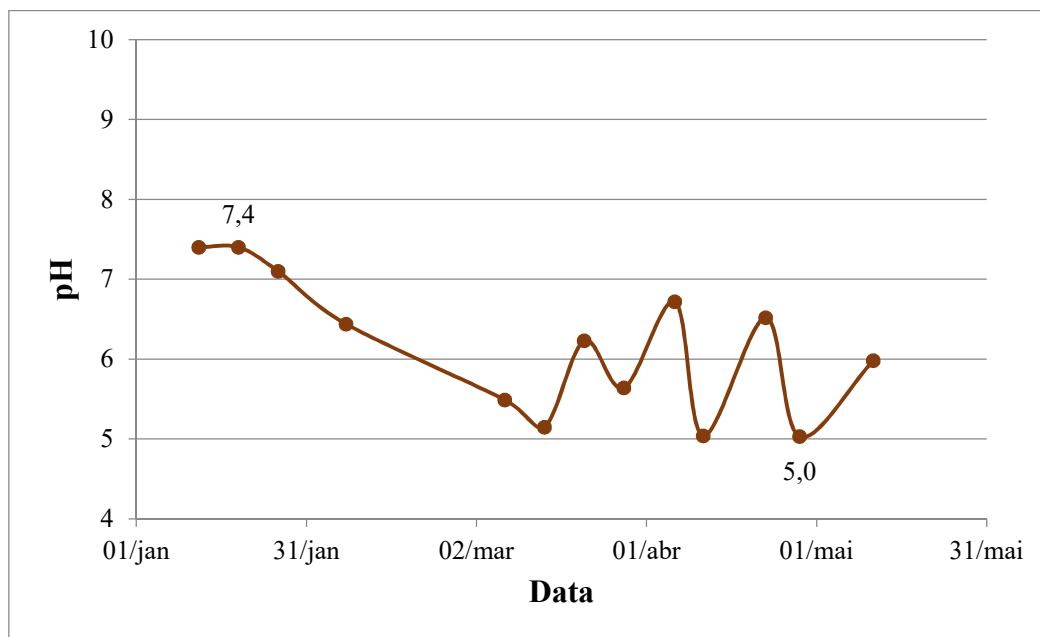


Figura 7.2: pH relativo ao resíduo na alimentação ao digestor.

O pH mostrou-se um fator preocupante para o processo, uma vez que na maioria das cargas alimentadas, o mesmo permaneceu abaixo da gama considerada ótima (6,5 a 7,5 na escala de *Sorensen*). Este parâmetro apresentou um máximo de 7,4, um mínimo de 5,0 e o seu valor médio foi de 6,2, ainda abaixo da gama ótima.

Assim, o pH foi um parâmetro a monitorizar nas lamas digeridas, de modo a avaliar se as gorduras alimentadas foram ou não um problema para o processo.

7.1.3. RELAÇÃO DE SÓLIDOS DO RESÍDUO

A relação de SSV/SST pretendeu avaliar a quantidade de matéria orgânica nas gorduras alimentadas. Os dados relativos a este parâmetro encontram-se representados na Figura 7.3.

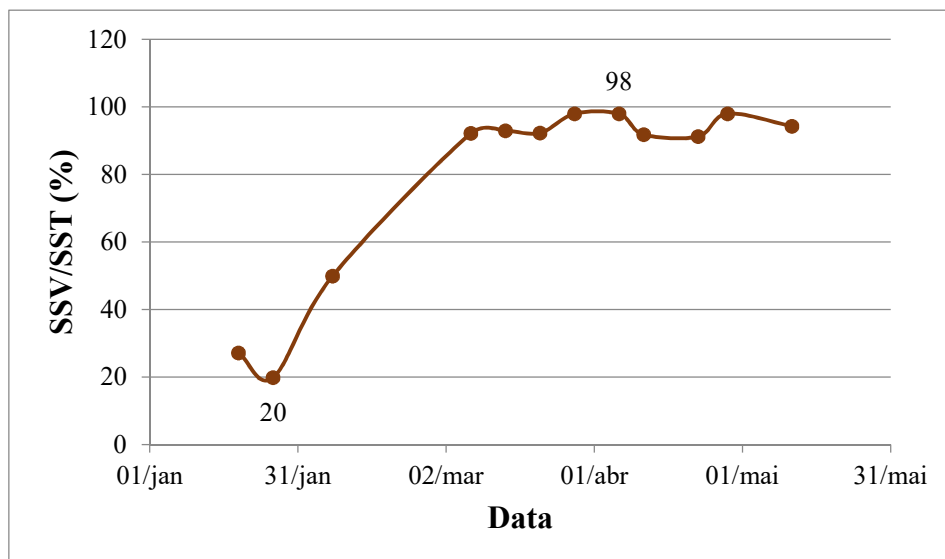


Figura 7.3: Evolução da razão SSV/SST do resíduo na alimentação.

De acordo com os resultados obtidos, é possível perceber que na grande maioria das cargas a percentagem de matéria orgânica foi elevada, apresentando um valor médio de 79%, variando o seu valor entre 20 e 98%, estando um pouco afastados da gama típica para esta razão (55 a 70%). Esta razão poderia ser um possível ponto crítico para o processo caso se encontrasse abaixo da gama típica, uma vez que demonstraria que não iria acrescentar a matéria orgânica pretendida para o processo de co-digestão anaeróbia.

7.1.4. RAZÃO C/N DO RESÍDUO

A razão C/N é dos fatores mais importantes à co-digestão anaeróbia, uma vez que o carbono funciona como substrato e o azoto como alimento para os microrganismos. Os resultados referentes a esta razão apresentam-se na Figura 7.4.

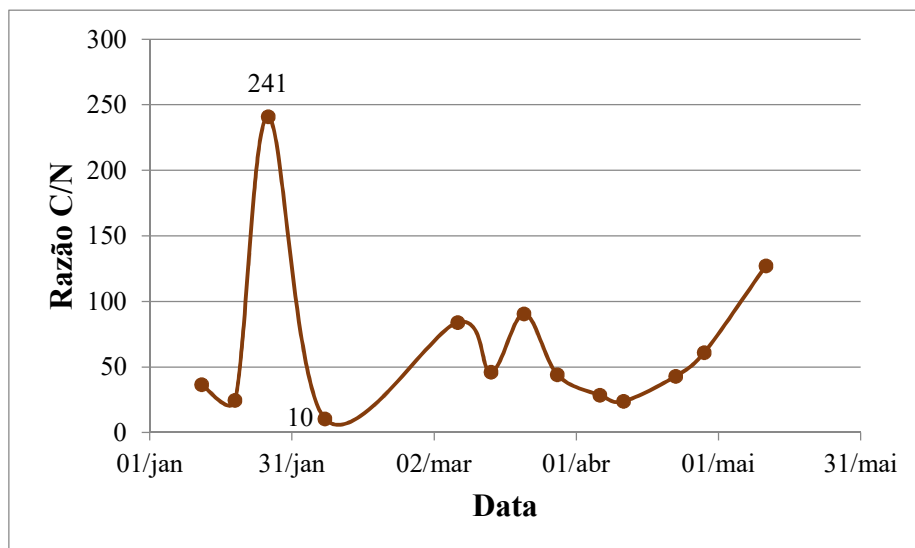


Figura 7.4: Razão C/N do resíduo na alimentação.

Verificou-se que na grande maioria das cargas alimentadas, esta razão se mostrou superior à razão ótima proposta na literatura (25:1), variando entre 10 e 241, com um valor médio de 66. Isto significa que existe um excedente de carbono no resíduo rico em gorduras alimentado ao digestor, o que não é um sinónimo de excesso de carbono no digestor, uma vez que as gorduras são misturadas com as lamas mistas, as quais apresentam valores baixos de razão C/N. Assim, este excesso não é um impedimento, mas sim uma ajuda no aumento pretendido de produção de biogás no processo de co-digestão anaeróbia. Contudo, foi também tida em conta a relação de nitrogénio amoniacal e nitratos na alimentação (Figura 7.5).

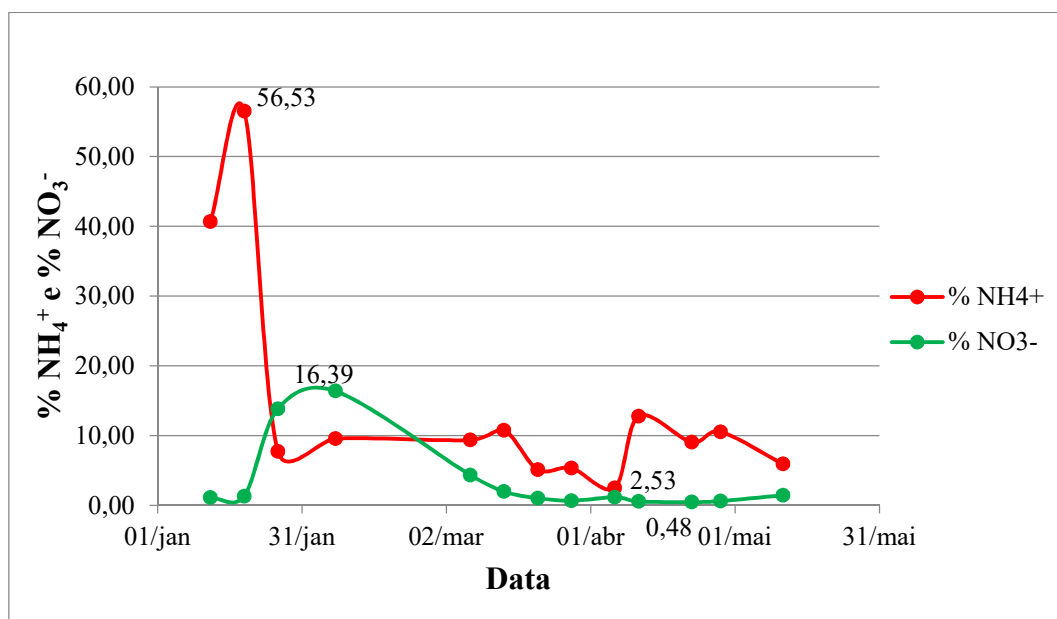


Figura 7.5: Relação de nitrogénio amoniacal e nitratos do resíduo na alimentação.

É possível evidenciar que nas cargas alimentadas em geral, o azoto existente foi mais elevado na forma de nitrogénio amoniacal do que na forma de nitratos, o que é um aspeto positivo no processo, uma vez que a presença de nitratos indicia condições anóxicas, que não serão as ideais para o desenvolvimento dos microrganismos envolvidos na co-digestão anaeróbia.

7.1.5. RAZÃO AGV/ALCALINIDADE DO RESÍDUO

A razão AGV/Alcalinidade é outro fator condicionante no processo de digestão anaeróbia, pelo que foi igualmente avaliado, como se mostra a Figura 7.6.

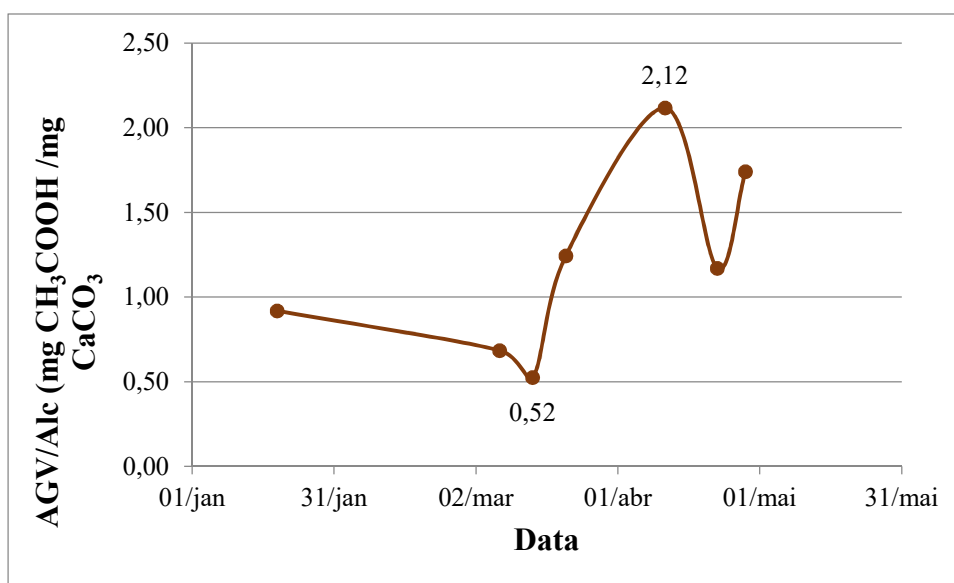


Figura 7.6: Razão AGV/Alcalinidade do resíduo na alimentação.

Para que o processo de co-digestão anaeróbia permaneça estável é crucial que esta razão não seja superior a 0,3, o que não se verificou em nenhuma das cargas alimentadas ao digestor.

A razão AGV/Alcalinidade variou entre 0,52 e 2,12, apresentando um valor médio de 1,20. Assim sendo, os ácidos gordos voláteis mostraram-se elevados, não sendo contrariados pela alcalinidade. Assim, esta razão foi um parâmetro a monitorizar nas lamas digeridas, de modo a avaliar se as gorduras alimentadas foram ou não um problema para o processo.

7.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS OPERATÓRIOS NA CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA

Existem fatores que condicionam o bom funcionamento da co-digestão anaeróbia, os quais foram avaliados neste processo após mistura do resíduo rico em gorduras com as lamas provenientes da ETAR nas proporções apresentadas na Figura 7.1. Assim sendo, foi analisado o pH, a temperatura e a razão AGV/Alcalinidade das lamas digeridas e foi feita a comparação os valores obtidos com os da literatura. A análise destes parâmetros foi focada no período de janeiro a maio de 2022, visto que neste período a adição deste resíduo foi frequente.

7.2.1. pH

Os resultados obtidos para o pH das lamas digeridas, parâmetro crucial no processo de co-digestão anaeróbia, são apresentados na Figura 7.7, e comparados com os valores de pH relativos ao resíduo alimentado ao digestor.

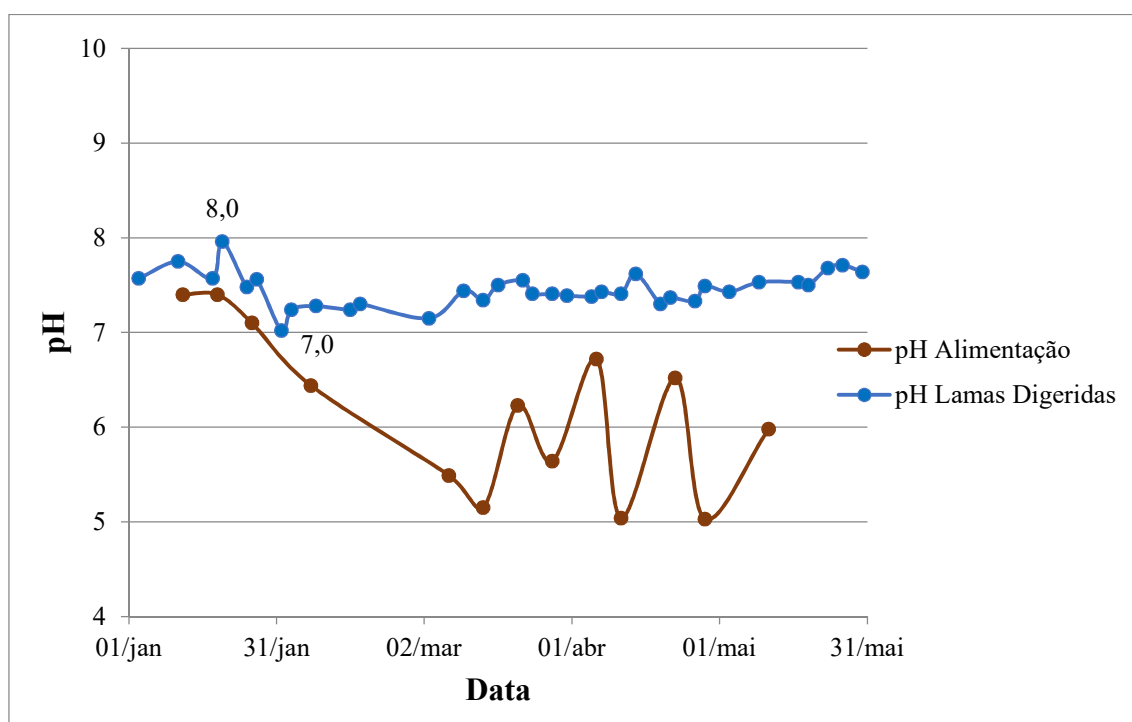


Figura 7.7: Comparação do pH na alimentação e após co-digestão anaeróbia.

Como se pode verificar na Figura 7.7, o valor de pH manteve-se relativamente constante e dentro dos valores referidos na literatura, nomeadamente, 6,5-7,5 na escala

de *Sorensen*. Apresentou um mínimo de 7,0, um máximo de 8,0 e um valor médio de 7,5. Os valores de pH acima de 7,5 poderiam ser um entrave na co-digestão anaeróbia, uma vez que acima deste valor a atividade metanogénica tende a diminuir, contudo, a produção de biogás não sofreu alterações.

A comparação deste parâmetro na alimentação e após co-digestão, permite verificar que, apesar de o pH da alimentação se mostrar abaixo da gama ótima referida na literatura, não afetou o processo de co-digestão anaeróbia, pois o pH das lamas digeridas encontrou-se dentro da mesma gama.

Assim sendo, o pH foi um parâmetro favorável ao bom funcionamento do processo de co-digestão anaeróbia, contribuindo para a viabilidade dos microrganismos, uma vez que têm preferência pela zona de pH neutro da escala de *Sorensen*.

7.2.2. TEMPERATURA

A temperatura, medida no digestor anaeróbio, foi outro parâmetro avaliado neste processo, apresentando-se os resultados obtidos na Figura 7.8.

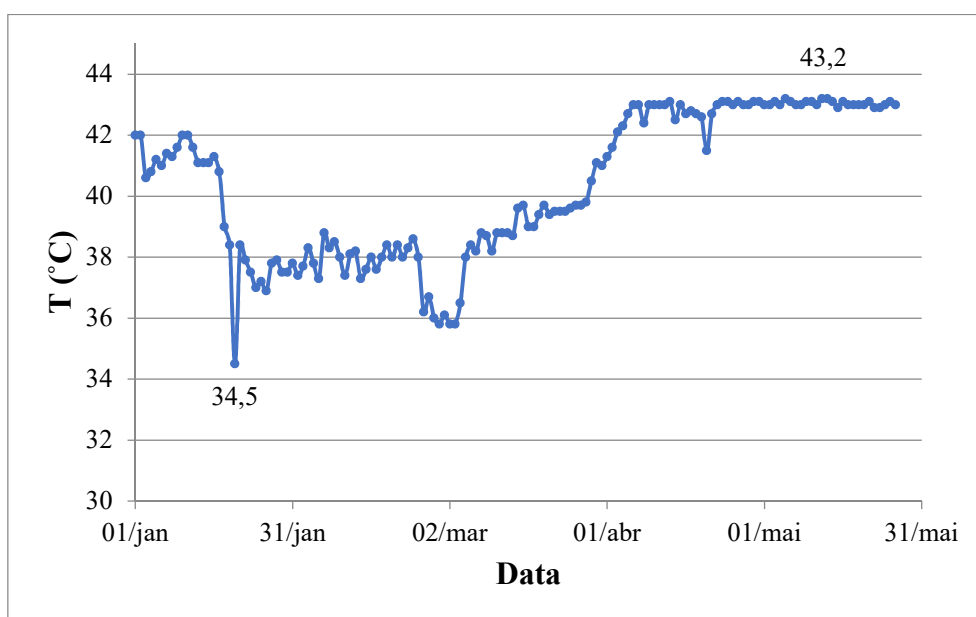


Figura 7.8: Temperatura das lamas digeridas.

Da análise da Figura 7.8 observa-se que a temperatura se manteve igualmente contida na gama de valores considerados ideais na literatura (25-40 °C) para o bom funcionamento da co-digestão anaeróbia. A temperatura das lamas digeridas apresentou um valor mínimo de 34,5 °C, um valor máximo de 43,2 °C e um valor médio de 40,3

°C. O valor máximo de 43,2 °C, bem como os seus valores circundantes superaram a gama ótima de temperatura, contudo a produção de biogás não se mostrou afetada negativamente por este aumento de temperatura, pelo contrário, manteve-se elevada.

Deste modo, é de notar que o regime mesofílico é benéfico para a digestão anaeróbia e nesta gama de temperatura existe uma maior estabilidade do processo, bem como uma maior produção de biogás.

7.2.3. ÁCIDOS GORDOS VOLÁTEIS E ALCALINIDADE

A razão AGV/Alcalinidade é um parâmetro importante na estabilidade do processo de co-digestão anaeróbia e deve ser controlada devido à natureza das gorduras. Os resultados referentes a esta razão encontram-se na Figura 7.9.

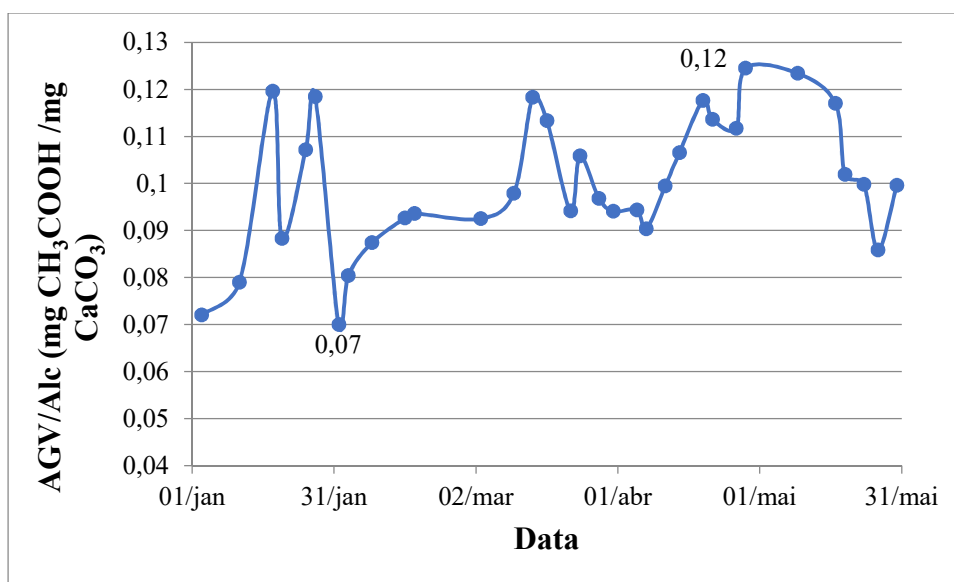


Figura 7.9: Razão AGV/Alcalinidade das lamas digeridas.

Esta razão apresentou um mínimo de 0,07, um máximo de 0,12 e um valor médio de 0,10. Como se pode evidenciar, esta razão nunca ultrapassou o valor limite descrito na literatura (0,3), o que demonstrou uma grande estabilidade do processo, mesmo com adição do resíduo rico em gorduras.

Tal como o pH, a razão AGV/Alcalinidade foi também comparada entre o resíduo alimentado e as lamas após co-digestão, como se representa a Figura 7.10. É de destacar nesta comparação que apesar da alimentação apresentar uma razão AGV/Alcalinidade elevada e acima do valor limite, o processo de co-digestão anaeróbia não sofreu alterações significativas, uma vez que esta razão nas lamas após digestão se

encontra abaixo do valor limite (0,3), o que demonstra, mais uma vez a estabilidade do processo.

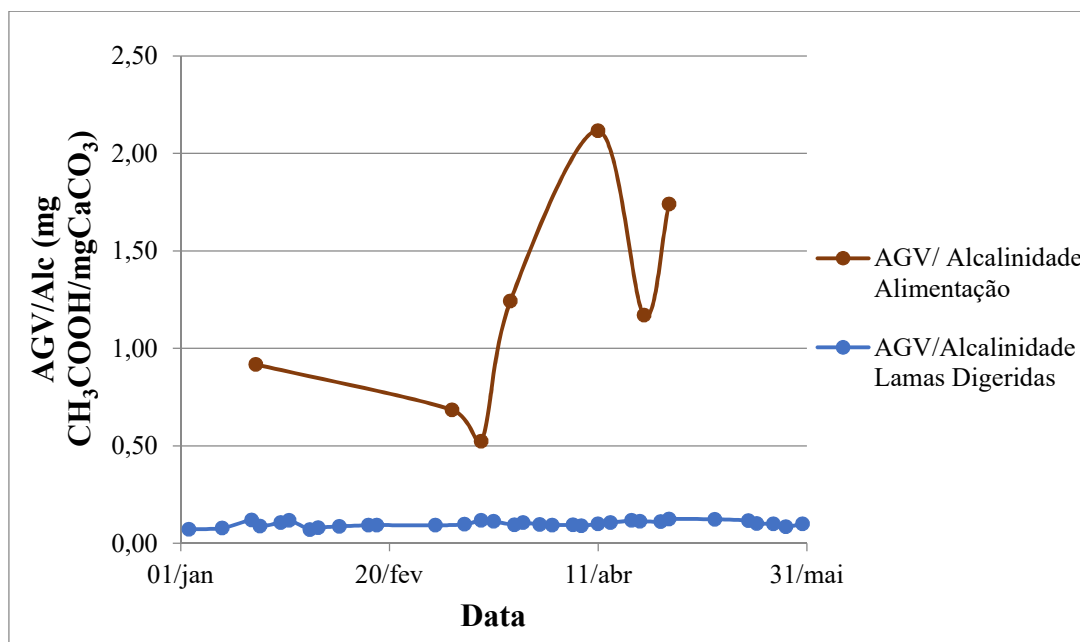


Figura 7.10: Comparação da razão AGV/Alcalinidade na alimentação e após co-digestão anaeróbia.

7.2.4. TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO

O tempo de retenção hidráulico foi determinado para cada mês de estudo do processo, como se mostra a Figura 7.11, variando entre 26 e 44 dias, com um valor médio de 34 dias. Sendo que a gama mínima é de 15 a 20 dias, este parâmetro manteve-se sempre acima do previsto na literatura para este processo, contudo há garantia que existiu substrato suficiente, uma vez que a produção de biogás se manteve elevada.

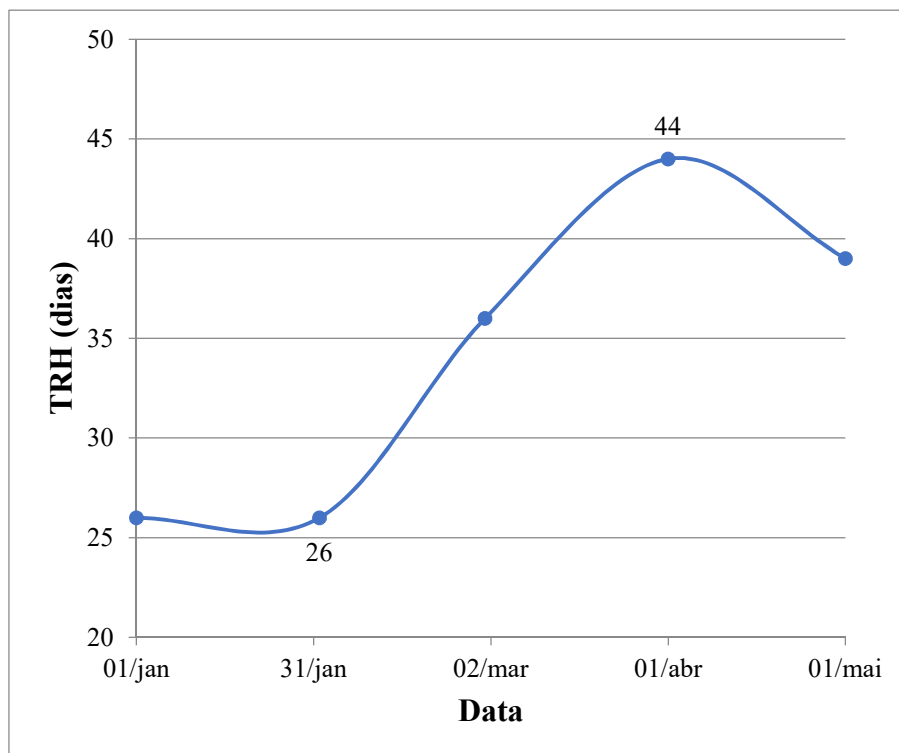


Figura 7.11: Tempo de retenção hidráulico das lamas no digestor.

7.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA

Outro objetivo desta dissertação, centrou-se na avaliação da produção de biogás, e consequente produção de energia na ETAR do Sousa. Foi avaliado o período de novembro de 2021 a maio de 2022 para comparação de resultados, verificando-se uma evolução favorável após o início da co-digestão anaeróbia do resíduo rico em gorduras, cuja adição está identificada nos gráficos seguinte (Figuras 7.12 a 7.14) por pontos a laranja. Os dados relativos ao funcionamento do digestor e produção de energia apresentam-se no Anexo C.

7.3.1. PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os resultados referentes à produção de biogás encontram-se na Figura 7.12. A produção de biogás apresentava um valor médio de $737,7 \text{ m}^3$ antes da adição do resíduo rico em gorduras e um valor médio de $1\,388 \text{ m}^3$ após a sua adição, a qual favoreceu este processo, resultando num aumento de cerca de 88% na produção de biogás.

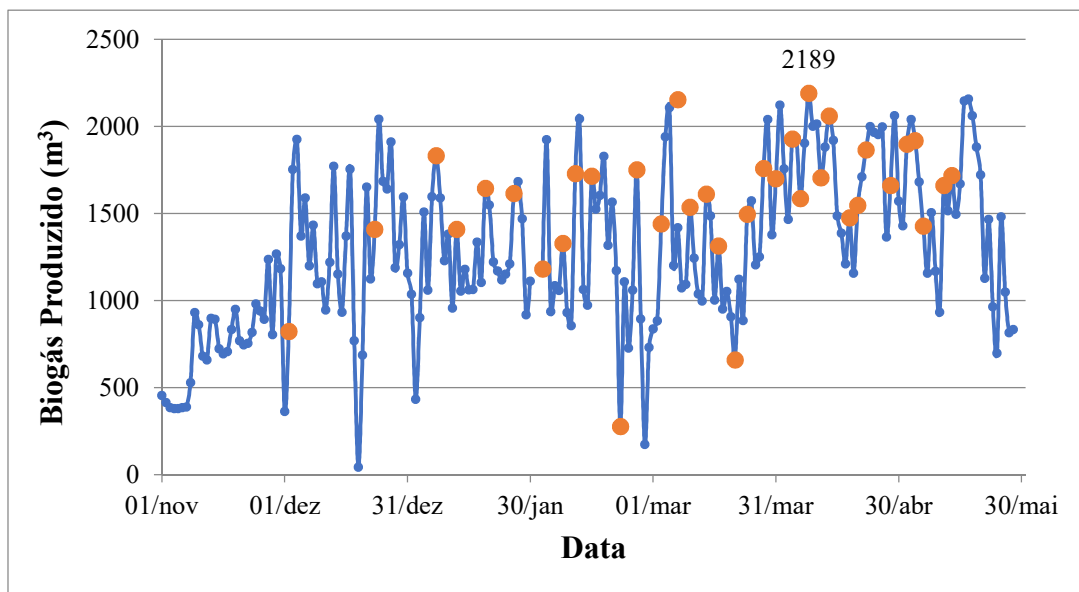


Figura 7.12: Produção de biogás na ETAR do Sousa.

7.3.2. PRODUÇÃO DE ENERGIA

A energia produzida pela cogeração foi igualmente avaliada e os seus valores encontram-se representados pela Figura 7.13.

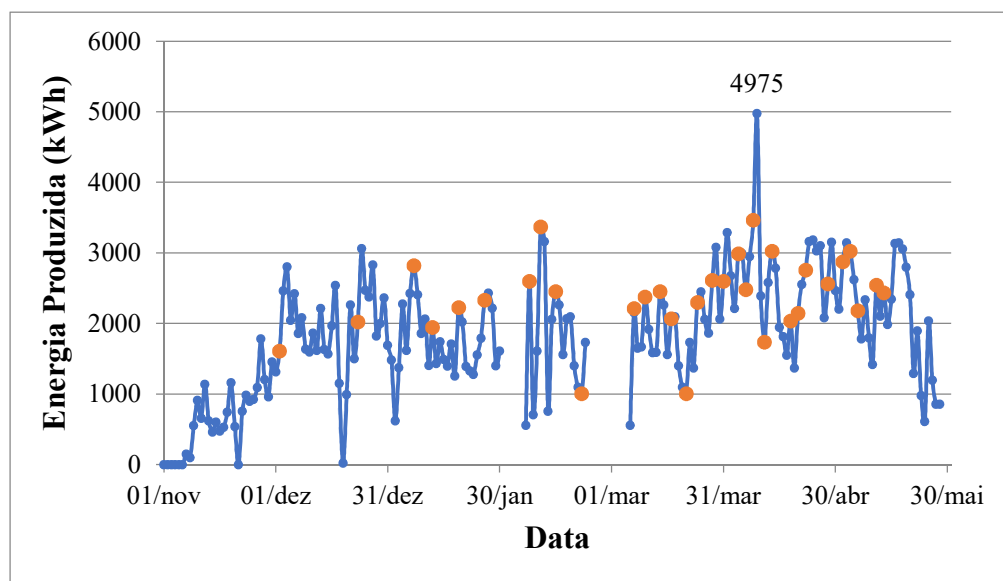


Figura 7.13: Produção de energia na ETAR do Sousa.

Na ETAR do Sousa, a energia produzida apresentou uma média diária de 645 kWh no período anterior à adição do resíduo rico em gorduras e uma média diária de 2049 kWh após adição de gorduras no digestor anaeróbio. Portanto, verificou-se um aumento de cerca de 218% na produção de energia com a adição de gorduras.

Os picos inferiores que se notam estão associados à escassa produção de biogás verificada ou, ainda, a problemas de funcionamento do cogrador, uma vez que este parou em alguns dias e noutros funcionou pouco tempo, com consequente menor produção de energia.

7.3.3. AUTOSSUFICIÊNCIA

A autossuficiência é um parâmetro que relaciona a energia produzida com o consumo de energia exigido na ETAR, avaliando a percentagem na qual a instalação se mostra autossuficiente. Os resultados inerentes a este parâmetro encontram-se representados na Figura 7.14.

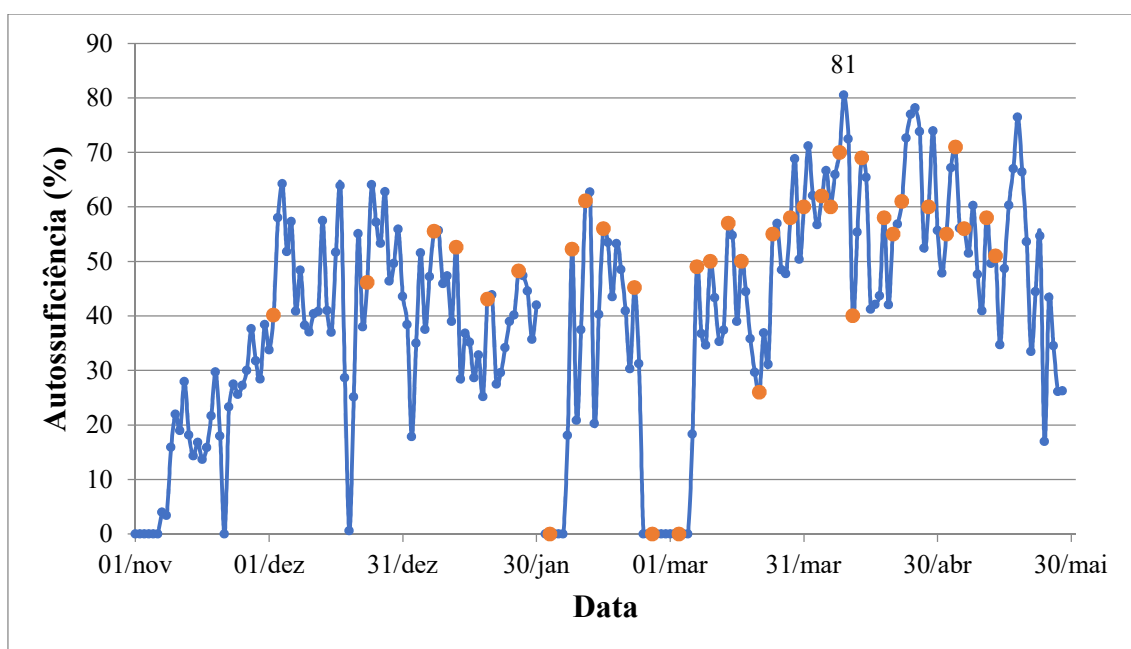


Figura 7.14: Autossuficiência da ETAR do Sousa.

A autossuficiência apresentou um valor médio diário de 17,5% no período anterior à adição do resíduo rico em gorduras e um valor médio diário de 43,4 % no período após a adição de gorduras. Em março e abril verificaram-se elevados valores de auto-suficiência que estão associados também ao período de descargas mais frequentes deste resíduo.

Os picos inferiores observados estão diretamente relacionados com paragens do cogrador por avarias ou manutenções programadas.

CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES

No decorrer do estágio curricular realizado na Estação de Tratamento de Águas Residuais do Sousa, no âmbito da dissertação de Mestrado, foi possível aprofundar os conhecimentos sobre o funcionamento de uma estação de tratamento de águas residuais, bem como o seu controlo analítico e objetivos de qualidade para descarga das mesmas, com vista à obtenção da melhor eficiência de tratamento possível.

O objetivo deste estágio baseou-se no controlo da digestão anaeróbia e consequente produção de biogás, analisando parâmetros que os influenciam, bem como a análise do comportamento do digestor anaeróbio após a adição de um resíduo rico em gorduras provenientes da indústria alimentar.

Deste modo, realizou-se a caracterização das cargas do resíduo rico em gorduras adicionadas ao digestor anaeróbio, uma vez que as suas características eram variáveis. A quantidade de gorduras face ao total alimentado apresentou um valor médio de 19%, variando de acordo com o necessário à produção de biogás pretendida. O pH das cargas alimentadas foi um fator que se mostrou inicialmente preocupante, uma vez que assumiu um valor médio de 6,2, que se encontra abaixo da gama ótima prevista na literatura (6,5 a 7,5). As gorduras alimentadas eram bastante espessas e apresentavam uma razão SSV/SST média de 79%, superior à gama ótima (55 a 70 %) e uma razão C/N média de 66:1, valor este muito superior à razão ótima recomendada (25:1). A razão AGV/Alcalinidade apresentou um valor médio de 1,20 mg CH_3COOH / mg CaCO_3 , que se mostrou bastante elevado face ao valor limite máximo previsto na literatura (0,3 mg CH_3COOH / mg CaCO_3).

Contudo, o facto de alguns parâmetros referentes ao resíduo rico em gorduras alimentado ao digestor se encontrarem fora da gama ótima não comprometeu o desempenho do processo de co-digestão anaeróbia que também foi avaliado. Quanto ao pH das lamas após digestão, este apresentou um valor médio de 7,5, o que mostra que na maioria das análises realizadas, o digestor permaneceu na gama ótima de pH, contribuindo, assim, para o bom funcionamento do processo. Em relação à temperatura, outro parâmetro crucial neste processo, permaneceu na gama ótima de regime mesofílico (25-40 °C), apresentando um valor médio de 40,3 °C, favorecendo o processo. As lamas digeridas mostraram também uma grande estabilidade, visto que a razão AGV/Alcalinidade média foi de 0,10, valor abaixo do limite máximo previsto

para esta razão. O tempo de retenção hidráulico no digestor anaeróbio, no decorrer do processo, foi de 34 dias, superior à gama mínima prevista na literatura (15 a 20 dias).

A produção de biogás e de energia foi também avaliada antes e após a adição de gorduras no processo de co-digestão anaeróbia. O biogás produzido médio antes da adição de gorduras era de 737,7 m³ e, com a adição de gorduras, elevou-se para 1388 m³, representando um aumento significativo de 88%. Por sua vez, a energia produzida média antes da adição de gorduras era de 645 kWh e apresentou uma subida até 2049 kWh, o que mostra um aumento de 218%. Neste sentido, a autossuficiência da ETAR do Sousa subiu, em valores médios, de 17,5 para 43,4 %.

Em suma, foi possível compreender que o resíduo rico em gorduras adicionado ao digestor trouxe vantagens para o processo de co-digestão anaeróbia com consequente aumento da produção de biogás e energia.

Com o intuito de promover a produção de biogás e, consequentemente, melhorar o processo de digestão anaeróbia sugere-se a investigação de outro tipo de resíduos com elevada carga orgânica, a fim de se obter uma reserva de resíduo alternativo, em períodos de insuficiência do resíduo rico em gorduras estudado, permitindo também a valorização energética desses resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Águas do Norte (2022) *Quem Somos*. [Online] Available at: <https://www.adnorte.pt/pt/aguas-do-norte/quem-somos/?id=5> (Accessed: 2/1/2022).
- [2] ETAR do Sousa (2011) *Memória Descritiva e Justificativa do Processo de Tratamento e Equipamento*.
- [3] Eddy, H. P. and Metcalf, L. (2015) *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. 5th edn. MCGRAW-HILL. ISBN: 9788580555233.
- [4] Ramalho, R. S. (1977) *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. New York: Academic Press Inc. ISBN: 0-12-576560-6.
- [5] Ministério do Ambiente (1997) *Decreto-Lei n.º 152/97*. Diário da República n.º 139/1997, Série I-A de 1997-06-19 2959 - 2967.
- [6] Ministério do Ambiente (1998) *Decreto-Lei n.º 236/98*. Diário da República n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01, 3676 - 3722.
- [7] Ministério do Ambiente (2009) *Decreto-Lei n.º 135/2009*. Diário da República n.º 107/2009, Série I de 2009-06-03, 3460 - 346.
- [8] Oliveira, B. (2017) *Controlo e avaliação do sistema de tratamento de águas residuais da ETAR de Gaia Litoral e ETAR de Febros*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- [9] Cavaleiro, A. and Alves, M. (2020) ‘Digestão Anaeróbia’, *Revista de Ciência Elementar*, 8. DOI: <http://doi.org/10.24927/rce2020.009>.
- [10] Long, J. H. *et al.* (2012) ‘Anaerobic Co-digestion of Fat, Oil and Grease (FOG): A review of gas production and process limitations’, *Process Safety and Environmental Protection*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.10.001>.
- [11] Uddin, M. M. and Wright, M. M. (2022) ‘Anaerobic digestion fundamentals, challenges and technological advances’, *Physical Sciences Reviews*. DOI: <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>.
- [12] Inayat, A. *et al.* (2021) ‘Process Simulation and Optimization of Anaerobic Co-Digestion’, *Frontiers in Energy Research*. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.764463>.
- [13] Lovato, G., Ratusznei, S. M. and Rodrigues, J. A. D. (2016) ‘Co-Digestion Approach in Anaerobic Processes for Biomethane Production’, *Bentham Science Publishers*, 3.
- [14] Caillot, V. A. *et al.* (2017) ‘Optimização da produção de metano através da codigestão anaeróbica dos resíduos da suinocultura’, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 24–26, p. 10.
- [15] Wu, W. (2007) ‘Anaerobic Co-digestion of Biomass for Methane Production: Recent Research Achievements’.
- [16] Alves, M., Pereira, A. and Mota, M. ‘Digestão Anaeróbia de Gorduras: Problemas e Soluções’, *Universidade do Minho*.

- [17] ETAR do Sousa (2020) *Procedimentos Laboratoriais*.
- [18] Meireles, M. (2011) *Otimização da Estação de Tratamento de Águas Residuais de Crestuma*. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Dissertação de Mestrado.
- [19] Portal de Tratamento de Água (2021) *Portal de Tratamento de Água*. [Online] Available at: <https://www.tratamentodeagua.com.br/>.
- [20] Eaton, A. *et al.* (1998) *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. 20th edn. Washington, DC : American Public Health Association.
- [21] Nascimento, S. (2017) *Avaliação da toxicidade de um efluente municipal como uma contribuição para a validação de um ensaio alternativo ao teste letal com peixes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [22] Isaac, P. (2013) *Waste Treatment: Proceedings of the Second Symposium on the Treatment of Waste Waters*. Edited by E. Science. Pergamon. ISBN: 9781483152240.
- [23] Hansen, H. C. and Koroleff, F. (1999) *Methods of Seawater Analysis*. 3rd edn. Edited by K. Grasshof, K. Kremling, and M. Ehrhardt. ISBN: 9783527295890.
- [24] Explicatorium (2021) *Soren Sorensen*. [Online] Available at: <http://www.explicatorium.com/biografias/soren-sorensen.html>.

ANEXO A: CONTROLO ANALÍTICO

O presente anexo descreve detalhadamente cada parâmetro analisado no controlo analítico.

A.1. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO pH

A determinação do pH através do método potenciométrico é essencial de forma a avaliar a acidez e basicidade de todas as amostras, com vista a apurar se as mesmas se encontram em níveis prejudiciais ao tratamento biológico ou qualquer outro tratamento [17].

Uma vez que os processos biológicos têm como consequência a diminuição do pH (devido à libertação de dióxido de carbono), é necessário que exista um controlo deste parâmetro, tendo em conta que o crescimento biológico é beneficiado quando o pH está próximo do neutro, entre os valores de pH 6 e 9 [17].

A potenciometria é um método que se baseia na medição da diferença de potencial de uma célula eletroquímica em condições estáticas (na ausência de corrente ou quando apenas uma corrente negligível atravessa a célula, a sua composição mantém-se inalterada). Para o efeito é utilizado um potenciómetro com uma célula eletroquímica, como se encontra na Figura A.1, contendo um eléctrodo padrão de hidrogénio, que desenvolve um potencial de acordo com a atividade do ião H^+ , e um de referência, que possui um potencial conhecido a temperatura constante. Desta forma, o pH depende da concentração de iões H^+ , pois quanto maior for a concentração dos mesmos, mais ácido será o meio e quanto menor for a concentração, mais alcalino será. A temperatura também influencia esta determinação (de acordo com a equação de *Nernst*), pelo que também deverá ser registada [17].

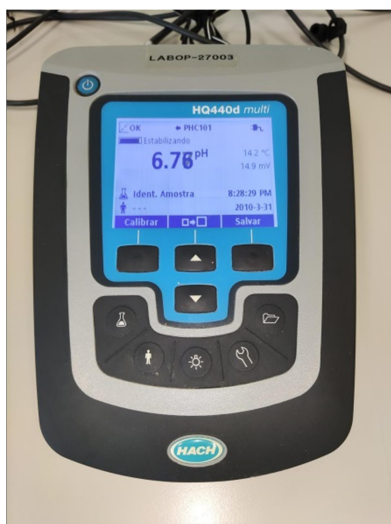


Figura A.1: Potenciômetro.

O pH é definido pela escala de *Sorensen* [24], representada na Figura A.2, e a sua determinação é calculada através da Equação A.1.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Equação A. 1

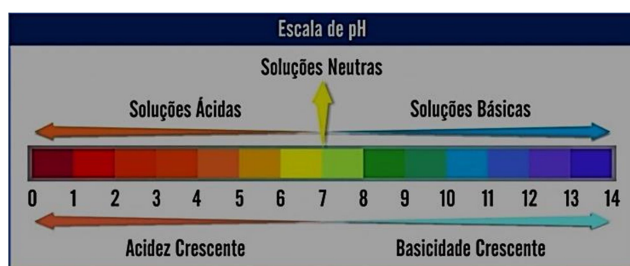


Figura A.2: Escala de pH de *Sorensen* (1909).

A.2. DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS, SÓLIDOS SUSPENSOS VOLÁTEIS E SÓLIDOS SUSPENSOS FIXOS

Esta determinação é de extrema importância, uma vez que nos fornece informações acerca do dimensionamento e controlo da ETAR, do volume de lamas estimado e dos padrões de qualidade de águas residuais. A taxa de remoção de matéria em suspensão de uma água residual é um dos fatores que permite avaliar a eficiência do tratamento [18].

A análise de Sólidos Suspensos Totais, SST, serve para medir a fração da matéria sólida que se encontra em suspensão e pode ser separada através de uma filtração por vácuo usando um filtro de fibra de vidro (marca Prat Dumas, tipo A/E, diâmetro 47 mm) pré-preparado (lavado e seco a 550 °C na mufla) (Figura A.3). Uma

vez que estas determinações se baseiam na diferença de massas do filtro (seco) antes e depois da filtração é por isso considerado um método gravimétrico. Com base no volume de amostra utilizado são calculados os resultados, que vêm expressos em concentração, mg/L [17].

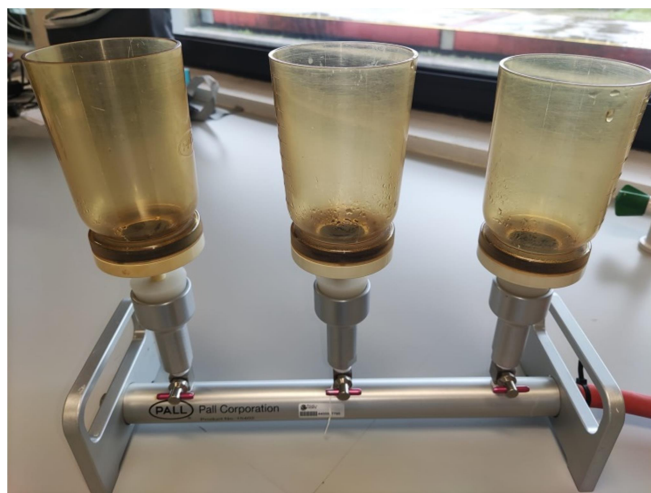


Figura A.3: Filtração por vácuo.

Os sólidos suspensos totais, SST, são obtidos através de uma filtração por vácuo numa rampa, que será posteriormente seco a 105 °C na estufa, durante 2 horas, e arrefecido em exsiccador. O volume de amostra utilizado será tanto maior quanto menor a quantidade de sólidos presentes (mais límpida for a amostra). O aumento de massa representará a quantidade de sólidos suspensos totais, de acordo com a Equação A.2, onde P_1 representa a massa inicial do filtro (g), P_2 a massa do filtro com a amostra seca (g) e V o volume da amostra (mL) [17].

$$\text{SST} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V} \times 1000 \quad \text{Equação A. 2}$$

Os sólidos suspensos voláteis, SSV, são determinados incinerando a amostra seca contida no filtro usado na determinação dos SST, a 550 °C, por um período de 10 minutos, o qual é arrefecido num exsiccador antes da pesagem. Os SSV são obtidos, em mg/L, através da Equação A.3, em que P_3 representa a massa do filtro com a amostra calcinada (g) [17].

$$\text{SSV} = \frac{(P_2 - P_3) \times 1000}{V} \times 1000 \quad \text{Equação A. 3}$$

Os sólidos suspensos fixos, SSF, são obtidos, em mg/L, pela diferença entre os SST e SSV, como mostra a Equação A.4 [17].

$$\text{SSF} = \text{SST} - \text{SSV} \quad \text{Equação A. 4}$$

A.3. DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS E SÓLIDOS VOLÁTEIS

A determinação dos Sólidos Totais e Voláteis (STV) permite ter informações sobre a concentração de sólidos presentes na água nas diversas fases de tratamento.

Este é um método gravimétrico pois também se baseia na diferença de massas [17].

Os sólidos totais, ST, são a quantidade de amostra que fica no cadinho após secagem total de um dado volume de amostra, na estufa a 105°C, durante 24 h. Os sólidos totais são expressos em concentração (mg/L) de acordo com a Equação A.5, onde P_1 representa a massa inicial do cadinho (g), P_2 a massa do cadinho com a amostra seca (g) e V o volume da amostra (L) [17].

$$\text{ST} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V} \times 1000 \quad \text{Equação A. 5}$$

Os sólidos voláteis, SV, são obtidos levando a amostra a calcinar na mufla a 550 °C durante 1 hora, e calculam-se, em mg/L, de acordo com a Equação A.6, em que P_3 simboliza a massa do cadinho com a amostra calcinada (g).

$$\text{SV} = \frac{(P_2 - P_3) \times 1000}{V} \times 1000 \quad \text{Equação A. 6}$$

A.4. DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA SECA E MATÉRIA VOLÁTIL

A determinação da percentagem de Matéria Seca, MS, e de Matéria Volátil, MV, é de extrema importância no controlo do processo de desidratação das lamas [18].

Esta determinação baseia-se essencialmente na diferença de massas. Numa primeira instância, leva-se o cadinho com a amostra (P_2) à estufa a 105 °C, durante um período de 24 h e deixa-se arrefecer num exsiccador. Por fim, pesa-se o cadinho com o

resíduo seco (P_3) e determina-se a percentagem de matéria seca de acordo com a Equação A.7, em que P_1 representa a massa do cadinho vazio (g) [17].

$$\%MS \text{ (mg/L)} = \frac{(P_3 - P_1)}{(P_2 - P_1)} \times 100 \quad \text{Equação A. 7}$$

Posteriormente, utilizando o resíduo da determinação da MS, leva-se a calcinar na mufla a 550 °C, durante 2h. Por fim, pesa-se o cadinho com a amostra calcinada (P_4) e determina-se a percentagem de matéria volátil de acordo com a Equação A.8 [17].

$$\%MV \text{ (mg/L)} = \frac{(P_3 - P_4)}{(P_2 - P_1)} \times 100 \quad \text{Equação A. 8}$$

A.5. DETERMINAÇÃO DA ALCALINIDADE E ÁCIDOS GORDOS VOLÁTEIS

A alcalinidade mede a capacidade para neutralizar ácidos. Este método permite determinar a quantidade equivalente de carbonato de cálcio, CaCO_3 , correspondente às bases presentes na lama.

Esta alcalinidade é necessária para neutralizar a acidez resultante da presença de dióxido de carbono, CO_2 , e ácidos voláteis, produzidos na digestão anaeróbia. Como estes compostos contribuem para a acidez da amostra, a qual vai ser usada na determinação dos ácidos voláteis, é necessário evitar a agitação vigorosa bem como a abertura do recipiente contendo a amostra [19].

A razão destas duas determinações (ácidos gordos voláteis / alcalinidade) fornece, deste modo, informação sobre a eficácia do digestor e consequente produção do biogás [19].

A determinação da alcalinidade recorre a uma titulação ácido/base, pelo que se titula a amostra, previamente centrifugada (Figura A.4), com ácido sulfúrico, H_2SO_4 0,1N até um pH=4 e se regista o volume gasto (V_1). De seguida, a amostra é levada até pH=3,5. O cálculo para esta mesma determinação é realizado de acordo com a Equação A.9 e é expresso em mg CaCO_3/L [17].

$$\text{Alcalinidade} = \frac{V_1 \times 0,1 \times 50 \times 1000}{25} \quad \text{Equação A. 9}$$



Figura A.4: Centrífuga.

Os Ácidos Gordos Voláteis, AGV, são igualmente compostos indicadores do funcionamento do processo de digestão anaeróbia e permitem averiguar, nomeadamente a produção de ácido acético [17].

Nesta análise utiliza-se a amostra proveniente da determinação da alcalinidade, colocando-a numa placa de aquecimento e espera-se 3 minutos após a ebulição da mesma, de seguida deixa-se arrefecer até a temperatura ambiente, e, posteriormente, adiciona-se hidróxido de sódio, NaOH 0,1N até neutralizar a mesma (pH=7) e regista-se, novamente, o volume gasto (V_2) e calcula-se de acordo com a Equação A.10, expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH/L}$ [17].

$$\text{AGV} = \frac{V_2 \times 0,1 \times 50 \times 1000}{25} \quad \text{Equação A. 10}$$

A.6. DETERMINAÇÃO DA CARÊNCIA QUÍMICA DE OXIGÉNIO

Na caracterização de águas residuais, não se identifica cada um dos compostos orgânicos individualmente por razões de tempo, sendo que se utiliza esta determinação para obter uma estimativa do teor global de matéria orgânica presente.

A análise da Carência Química de Oxigénio permite determinar a quantidade de oxigénio equivalente ao dicromato de potássio, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ consumido, pois quantifica os compostos orgânicos (e inorgânicos) oxidáveis pelo dicromato [20].

À amostra é adicionada solução de digestão e ainda solução ácida, presentes em kits. A amostra é colocada a digerir no reator (Figura A.5) a 170°C, durante 15 minutos [17].



Figura A.5: Termoreator.

O ião cloreto, habitualmente presente nas águas residuais domésticas, representa uma interferência nesta determinação pela sua capacidade de reagir com o ião prata (precipitando sob a forma de cloreto de prata, e assim consumindo o catalisador), pelo que a adição do sulfato de mercúrio vai originar a complexação dos cloretos, contornando assim esta interferência. Já o ião dicromato oxida a matéria orgânica presente na amostra, passando para Cr^{3+} , com cor verde, sendo então determinado fotometricamente num espectrofotómetro, como representa a Figura A.6 [21].



Figura A.6: Espectrofotómetro.

A.7. DETERMINAÇÃO DA CARÊNCIA BIOQUÍMICA DE OXIGÉNIO

A Carência Bioquímica de Oxigénio é um parâmetro que permite determinar a quantidade de oxigénio utilizado pela amostra, durante o período de incubação de 5 dias, a 20 °C, o que permite estimar a quantidade de oxigénio que será necessária para estabilizar biologicamente a matéria orgânica presente. O oxigénio é consumido na degradação bioquímica da matéria orgânica, mas também na oxidação de compostos orgânicos, como o azoto, e inorgânicos, como sulfuretos de ferro, razão pela qual são adicionadas substâncias químicas inibidoras para impedir estas oxidações [21].

A oxidação de algumas formas de azoto constitui uma interferência relativamente forte nesta determinação, tal como a existência de sólidos em suspensão ou a falta de agitação da amostra, que afetam a precisão e exatidão da determinação.

O método utilizado para este fim é o método do manómetro, desenvolvido por *Caldwell* e *Langelier*, que se baseia no decréscimo de pressão, consequência do consumo de oxigénio pelos microrganismos que oxidam a matéria orgânica [22].

Assim, os frascos são preenchidos pelo volume de amostra estipulado de acordo com a concentração de matéria orgânica esperada, onde os microrganismos irão degradar a matéria orgânica utilizando o oxigénio presente nos frascos. Como consequência irá ser produzido dióxido de carbono neste processo e o mesmo será absorvido por pastilhas de hidróxido de sódio, adicionadas anteriormente num cesto de borracha colocado na parte superior do frasco onde está contida a amostra. As mudanças de pressão, consequentes do consumo de oxigénio, são medidas pelo BODTrak II (Figura A.7) permitindo estimar o valor deste parâmetro [17, 21].

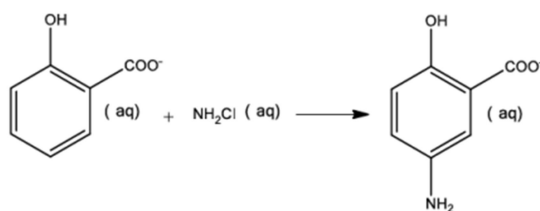
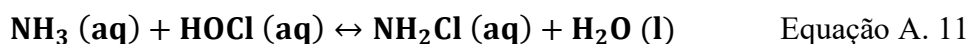


Figura A.7: BODTrak II.

A.8. DETERMINAÇÃO DE AZOTO AMONIAL

Esta análise é de extrema importância pois o azoto amoniacal é nocivo para o ambiente e pode prejudicar o tratamento nos reatores biológicos, uma vez que em elevadas quantidades pode favorecer o crescimento de cianobactérias, por exemplo.

Nesta determinação, o azoto amoniacal, em solução fortemente alcalina, está sob a forma de amoníaco, NH_3 , o qual ao reagir com iões hipoclorito, do ácido hipocloroso, HOCl , origina monocloramina, NH_2Cl (Equação A.11). A monocloramina reage com o salicilato de sódio, $\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_3$, originando o 5-aminossalicato, $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_3$ (Equação A.12) e, por fim, este último oxida-se por ação de um catalisador, o nitroprussiato de sódio. Assim, é gerado um complexo verde que pode ser medido espectralmente [21].



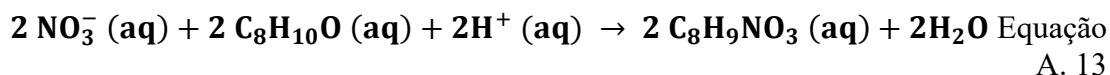
Equação A. 12

A.9. DETERMINAÇÃO DE AZOTO TOTAL

O azoto é um elemento fundamental para o desenvolvimento de diversos microrganismos, mas por outro lado o seu excesso leva a desequilíbrios, como a eutrofização do meio ambiental aquático onde é feita a sua descarga, por isso, é essencial a análise deste parâmetro.

Os compostos de azoto orgânicos e inorgânicos são transformados em nitratos através do método de *Koreleff*, que se traduz numa reação num termoreator a altas temperaturas durante 15 minutos [23].

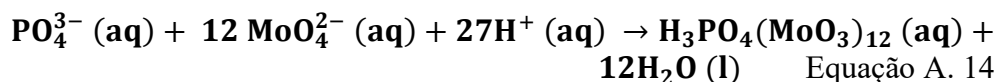
Em solução com ácido sulfúrico e fosfórico, o nitrato reage com 2,6-dimetilfenol, $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$, originando 4-nitro-2,6-dimetilfenol, $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_3$ (Equação A.13) que será determinado espectralmente [21].



A.10. DETERMINAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL

Este nutriente é bastante importante no crescimento de microrganismos biológicos, sendo necessário o controlo do mesmo para assegurar o normal funcionamento dos processos, mas o seu excesso nos cursos de água pode levar à eutrofização do meio aquático.

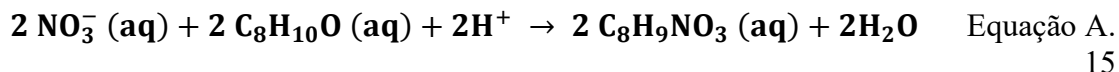
Em meio sulfúrico, durante 15 minutos num termoreator a altas temperaturas, os iões ortofosfato reagem com os iões molibdato e originam o ácido molibdofosfórico. O ácido ascórbico reduz o ácido molibdofosfórico a azul de fosfomolibdénio (PMB) que é possível ser determinado espectrofotometricamente (Equação A.14) [21].



A.11. DETERMINAÇÃO DE NITRATOS

Os nitratos são aproveitados pelas cianobactérias como fontes de nutrientes, pelo que é necessário o controlo deste nutriente, que tal como qualquer forma de azoto pode contribuir para a eutrofização dos ecossistemas aquáticos quando presente em excesso.

Em meio sulfúrico e fosfórico, os iões nitrato reagem com o 2,6-dimetilfenol e formam o complexo 4-nitro-2,6-dimetilfenol (Equação A.15). Este último tem a possibilidade de ser determinado espectrofotometricamente [21].



ANEXO B: DADOS RELATIVOS AO RESÍDUO RICO EM GORDURAS

Neste anexo serão apresentados os dados relativos às cargas de resíduo rico em gorduras (designado por “gorduras”) adicionadas ao digestor. Na Tabela B.1 encontra-se a quantidade adicionada, assim como a percentagem face à alimentação total ao digestor. Nesta tabela estão também inseridos os dados dos sólidos existentes em cada carga.

Tabela B.1: Dados relativos à alimentação ao digestor.

Data	Gorduras (m ³)	Lamas Mistas (m ³)	Gorduras na Alimentação (%)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSV/SST (%)
07/jan	15,00	125,98	11			
12/jan	14,00	58,52	19			
19/jan	18,60	141,98	12	108040	29348	27
26/jan	15,00	66,63	18	82945	16470	20
02/fev	21,16	70,88	23			
07/fev	15,00	91,63	14	7538	3758	50
10/fev	16,90	114,63	13			
14/fev	14,14	82,13	15			
21/fev	18,88	97,25	16			
25/fev	12,50	78,81	14			
03/mar	15,00	40,75	27			
07/mar	18,00	60,25	23	7212	6644	92
10/mar	16,00	55,13	22			
14/mar	17,44	58,50	23	26508	24620	93
17/mar	12,84	82,88	13			
21/mar	18,55	41,63	31	34308	31640	92
24/mar	15,00	71,50	17			
28/mar	19,00	84,50	18	106140	103960	98
31/mar	14,49	68,38	17			
04/abr	16,80	55,13	23			
06/abr	17,22	76,63	18	86220	84400	98
08/abr	11,56	66,88	15			
11/abr	14,82	59,25	20	5220	4790	92
13/abr	12,04	79,75	13			
18/abr	14,86	32,25	32			
20/abr	12,64	28,00	31			
22/abr	17,32	47,25	27	9220	8410	91
28/abr	16,00	33,75	32	8860	8680	98
02/mai	16,00	63,25	20			
04/mai	16,96	96,50	15			
06/mai	14,28	51,75	22			
11/mai	9,24	81,25	10	56350	53120	94
13/mai	9,64	64,63	13			

A Tabela B.2 contém os dados relativos aos nutrientes presentes em cada carga de gorduras adicionada ao digestor, bem como o pH e razão AGV/Alcalinidade.

Tabela B.2: Dados relativos à alimentação ao digestor.

Data	CQO (mg/L)	P (mg/L)	N (mg/L)	NH ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	Razão C/N	% NH ₄	% NO ₃	pH	Alc (mg CaCO ₃)	AGV (mg CH ₃ COOH)	AGV/Alc (mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃)
07/jan												
12/jan	177254	455	4854	2540	240	36,52	40,70	1,12	7,40			
19/jan	145700	810	5930	4310	350	24,57	56,53	1,33	7,40	8060	7400	0,92
26/jan	130600	513	542	54	332	240,96	7,75	13,83	7,10			
02/fev												
07/fev	11300	21	1080	133	784	10,46	9,58	16,39	6,44			
10/fev												
14/fev												
21/fev												
25/fev												
03/mar												
07/mar	134400	466	1600	193	309	84,00	9,38	4,36	5,49	5700	3900	0,68
10/mar												
14/mar	39600	294	858	119	75,6	46,15	10,79	1,99	5,15	5724	3000	0,52
17/mar												
21/mar	117800	339	1300	86	60,8	90,62	5,15	1,06	6,23	3000	3730	1,24
24/mar												
28/mar	49400	301	1120	77	34	44,11	5,35	0,69	5,64			
31/mar												
04/abr												
06/abr	35000	157	1230	40	64	28,46	2,53	1,17	6,72			
08/abr												
11/abr	25490	314	1070	176	28	23,82	12,79	0,59	5,04	2740	5800	2,12
13/abr												
18/abr												
20/abr												
22/abr	22110	181	514	60	11	43,02	9,08	0,48	6,52	3590	4200	1,17
28/abr	34700	181	568	77	16	61,09	10,54	0,64	5,03	1000	1740	1,74
02/mai												
04/mai												
06/mai												
11/mai	150100	200	1180	90	76	127,20	5,93	1,45	5,98			
13/mai												

ANEXO C: DADOS DO FUNCIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO

O presente anexo contém os dados gerais de funcionamento do digestor anaeróbio da ETAR do Sousa na Tabela C.1., bem como os valores mínimos, máximos e médios de fatores cruciais nesta dissertação na Tabela C.2.

Tabela C.1: Dados Gerais do Funcionamento da ETAR do Sousa.

Data	Caudal (m ³)	Temperatura (°C)	Biogás Produzido (m ³)	Energia Produzida (kWh)	Consumo de Energia (kWh)	Funcionamento Cogrador (h)	Autosuficiência (%)	Adição De Gorduras (m ³)
01/nov	9440	36,0	455	0	6512	0	0	
02/nov	7682	35,0	414	0	3063	0	0	
03/nov	7030	35,0	383	0	2325	0	0	
04/nov	5786	35,0	378	0	3905	0	0	
05/nov	5834	35,0	378	0	3828	0	0	
06/nov	6069	33,8	384	0	3716	0	0	
07/nov	5714	33,2	388	148	3611	1	4	
08/nov	5581	35,0	527	97	2790	1	3	
09/nov	5663	35,0	930	549	2907	5	16	
10/nov	5811	33,0	861	910	3235	8	22	
11/nov	5705	31,8	680	656	2810	6	19	
12/nov	5600	32,0	658	1138	2935	10	28	
13/nov	6008	32,0	897	619	2796	5	18	
14/nov	5729	32,3	891	459	2750	3	14	
15/nov	5464	32,2	722	601	2986	5	17	
16/nov	5651	31,8	693	475	3000	5	14	
17/nov	5717	31,3	706	529	2816	5	16	
18/nov	5704	30,9	834	744	2695	6	22	
19/nov	5895	30,9	948	1158	2743	10	30	
20/nov	5563	30,9	768	537	2450	5	18	
21/nov	6563	30,8	745	0	2423	0	0	
22/nov	5432	30,5	754	754	2487	7	23	
23/nov	3465	30,2	816	980	2592	9	27	
24/nov	5892	30,3	980	896	2609	8	26	
25/nov	5503	30,3	939	926	2472	8	27	
26/nov	5603	30,5	892	1091	2550	9	30	
27/nov	7205	30,5	1236	1779	2951	15	38	
28/nov	5984	29,0	803	1205	2593	11	32	
29/nov	5190	29,0	1266	961	2426	9	28	
30/nov	5438	29,3	1182	1456	2337	13	38	
01/dez	6124	29,8	363	1313	2577	11	34	
02/dez	6096	30,0	823	1608	2400	14	40	17,00
03/dez	6693	30,5	1752	2461	1781	21	58	
04/dez	8024	31,8	1925	2801	1558	24	64	
05/dez	6673	33,1	1371	2044	1905	18	52	

06/dez	7326	33,3	1588	2421	1806	19	57	
07/dez	10669	34,3	1199	1858	2689	15	41	
08/dez	10012	34,4	1433	2081	2222	17	48	
09/dez	9108	34,4	1096	1638	2643	14	38	
10/dez	9243	35,6	1107	1597	2714	13	37	
11/dez	7702	35,3	944	1862	2745	15	40	
12/dez	6592	35,6	1220	1616	2343	13	41	
13/dez	6341	35,3	1770	2214	1639	18	57	
14/dez	6076	36,5	1151	1634	2354	13	41	
15/dez	6252	36,5	933	1569	2675	13	37	
16/dez	6061	36,2	1370	1969	1843	16	52	
17/dez	6123	36,3	1755	2538	1434	21	64	
18/dez	6500	37,2	768	1152	2872	10	29	
19/dez	6100	35,9	42	22	3750	0	1	
20/dez	8024	35,4	685	994	2963	8	25	
21/dez	7975	35,6	1651	2261	1845	19	55	
22/dez	8893	36,4	1123	1501	2449	13	38	
23/dez	9497	36,4	1408	2023	2362	17	46	15,00
24/dez	10382	37,3	2040	3059	1716	24	64	
25/dez	10431	38,0	1684	2471	1851	21	57	
26/dez	14227	39,0	1640	2376	2081	21	53	
27/dez	11825	40,2	1910	2828	1676	23	63	
28/dez	8639	41,1	1187	1822	2106	14	46	
29/dez	8799	41,3	1319	1998	2032	16	50	
30/dez	8136	42,0	1594	2362	1866	20	56	
31/dez	7959	42,2	1156	1692	2191	14	44	
01/jan	7309	42,0	1036	1480	2377	13	38	
02/jan	6570	42,0	432	618	2847	6	18	
03/jan	6690	40,6	900	1371	2546	11	35	
04/jan	7707	40,8	1508	2277	2141	19	52	
05/jan	9633	41,2	1059	1616	2691	13	38	
06/jan	8193	41,0	1595	2428	2715	18	47	
07/jan	7045	41,4	1831	2820	2258	21	56	15,00
08/jan	7827	41,3	1588	2409	1919	18	56	
09/jan	9377	41,6	1229	1858	2192	14	46	
10/jan	8664	42,0	1380	2064	2297	16	47	
11/jan	6607	42,0	957	1405	2200	11	39	
12/jan	6423	41,6	1408	1942	1750	16	53	14,00
13/jan	6775	41,1	1053	1433	3615	11	28	
14/jan	6774	41,1	1179	1740	2987	14	37	
15/jan	6918	41,1	1061	1491	2751	12	35	
16/jan	6859	41,3	1064	1397	3487	11	29	
17/jan	6733	40,8	1334	1709	3503	14	33	
18/jan	6510	39,0	1103	1255	3735	10	25	
19/jan	6667	38,4	1644	2226	2939	18	43	18,60
20/jan	6565	38,5	1548	2022	2592	16	44	
21/jan	6678	38,4	1220	1390	3672	11	27	

22/jan	6892	37,9	1169	1325	3159	11	30	
23/jan	6452	37,5	1118	1278	2465	10	34	
24/jan	6375	37,0	1150	1555	2439	13	39	
25/jan	6392	37,2	1210	1791	2672	15	40	
26/jan	6484	36,9	1613	2332	2498	21	48	15,00
27/jan	6929	37,8	1682	2430	2700	21	47	
28/jan	7638	37,9	1469	2217	2756	19	45	
29/jan	7198	37,5	917	1399	2520	12	36	
30/jan	6634	37,5	1110	1608	2226	14	42	
31/jan		37,8						
01/fev	4308	37,4			2330	9	0	
02/fev	6661	37,7	1181		2334	21	0	21,16
03/fev	6544	38,3	1924		1412	23	0	
04/fev	6411	38,7	936		2131	11	0	
05/fev	6881	38,3	1085		2334	14	0	
06/fev	6630	38,8	1058	558	2535	13	18	
07/fev	6244	38,3	1328	2596	2373	14	52	15,00
08/fev	6369	38,5	931	707	2687	8	21	
09/fev	6509	38,0	855	1608	2684	10	37	
10/fev	6590	37,4	1729	3370	2146	20	61	16,90
11/fev	6703	38,1	2043	3159	1881	23	63	
12/fev	6700	38,2	1063	756	2980	13	20	
13/fev	9512	37,3	972	2059	3053	11	40	
14/fev	8787	37,6	1713	2451	1927	20	56	14,14
15/fev	6624	38,0	1524	2261	1966	18	53	
16/fev	7425	37,6	1603	1559	2024	18	44	
17/fev	7220	38,0	1828	2069	1815	21	53	
18/fev	6809	38,4	1316	2096	2227	15	48	
19/fev	7149	38,0	1564	1399	2022	18	41	
20/fev	6683	38,4	1171	1094	2521	13	30	
21/fev	6260	38,0	275	1007	1221	3	45	18,88
22/fev	6484	38,3	1106	1732	3820	0	31	
23/fev	6378	38,6	726		3048	0	0	
24/fev	6376	38,0	1060		3265	26	0	
25/fev	6592	36,2	1749		2781	20	0	12,50
26/fev	6771	36,7	893		2954	14	0	
27/fev	6448	36,0	173		3884	7	0	
28/fev	6242	35,8	731		3057	9	0	
01/mar	7845	36,1	837		3025	11	0	
02/mar	8582	35,8	882		2942	10	0	
03/mar	9075	35,8	1440		2319	17	0	15,00
04/mar	7783	36,5	1939		1651	22	0	
05/mar	7155	38,0	2107		1404	25	0	
06/mar	6825	38,4	1200	558	2485	14	18	
07/mar	7160	38,2	1417	2152	2212	17	49	18,00
08/mar	8775	38,8	1071	1650	2838	12	37	
09/mar	11922	38,7	1092	1666	3143	12	35	

10/mar	13545	38,2	1534	2374	2379	17	50	16,00
11/mar	10248	38,8	1242	1919	2512	14	43	
12/mar	11709	38,8	1037	1584	2910	12	35	
13/mar	9590	38,8	996	1589	2661	12	37	
14/mar	6914	38,7	1611	2451	1882	19	57	17,44
15/mar	6769	39,6	1486	2261	1867	17	55	
16/mar	7047	39,7	1002	1559	2443	11	39	
17/mar	6978	39,0	1313	2069	2031	16	50	12,84
18/mar	7312	39,0	951	2096	2621	15	44	
19/mar	7812	39,4	1052	1399	2510	11	36	
20/mar	7124	39,7	906	1094	2600	9	30	
21/mar	6487	39,4	659	1007	2888	8	26	13,55
22/mar	11899	39,5	1121	1732	2965	13	37	
23/mar	10378	39,5	884	1369	3034	10	31	
24/mar	7258	39,5	1494	2298	1902	18	55	15,00
25/mar	6924	39,6	1572	2447	1851	18	57	
26/mar	7154	39,7	1205	2059	2195	15	48	
27/mar	6600	39,7	1251	1864	2043	13	48	
28/mar	6432	39,8	1759	2612	1899	20	58	19,00
29/mar	6910	40,5	2039	3080	1398	23	69	
30/mar	6809	41,1	1376	2063	2034	16	50	
31/mar	6833	41,0	1699	2598	1739	38	60	14,49
01/abr	6901	41,3	2122	3289	1335	17	71	
02/abr	6921	41,6	1756	2677	1637	9	62	
03/abr	6416	42,1	1465	2213	1689	17	57	
04/abr	6357	42,3	1928	2990	1860	22	62	16,8
05/abr	6207	42,7	1932	2990	1497	23	67	
06/abr	6164	43,0	1585	2478	1625	19	60	17,22
07/abr	6275	43,0	1903	2948	1523	22	66	
08/abr	10779	42,4	2189	3463	1479	25	70	11,56
09/abr	9303	43,0	2001	4975	1205	24	81	
10/abr	6878	43,0	2013	2389	908	24	72	
11/abr	10671	43,0	1705	1735	2630	21	40	14,82
12/abr	10243	43,0	1881	2581	2082	19	55	
13/abr	7353	43,1	2058	3023	1339	23	69	12,04
14/abr	6550	42,5	1919	2785	1474	21	65	
15/abr	6972	43,0	1486	1946	2775	14	41	
16/abr	6960	42,7	1386	1812	2491	14	42	
17/abr	5717	42,8	1209	1551	1998	12	44	
18/abr	5064	42,7	1474	2035	1469	15	58	14,86
19/abr	5435	42,6	1156	1369	1889	11	42	
20/abr	5607	41,5	1546	2143	1734	17	55	12,64
21/abr	10354	42,7	1710	2553	1938	20	57	
22/abr	10914	43,0	1864	2756	1761	22	61	17,32
23/abr	7507	43,1	1999	3159	1192	24	73	
24/abr	6293	43,1	1966	3184	954	24	77	
25/abr	5849	43,0	1952	3029	847	24	78	

26/abr	6366	43,1	1997	3100	1101	24	74	
27/abr	6544	43,0	1365	2081	1886	15	52	
28/abr	6202	43,0	1661	2562	1680	19	60	16,00
29/abr	6295	43,1	2061	3150	1113	24	74	
30/abr	6556	43,1	1570	2464	1965	19	56	
01/mai	5996	43,0	1428	2203	2402	17	48	
02/mai	5874	43,0	1897	2875	2315	22	55	16,00
03/mai	5889	43,1	2039	3140	1537	23	67	
04/mai	6129	43,0	1918	3023	1258	22	71	16,96
05/mai	6163	43,2	1681	2621	2055	20	56	
06/mai	6101	43,1	1426	2180	1717	17	56	14,28
07/mai	6298	43,0	1157	1779	1678	14	51	
08/mai	6181	43,0	1504	2334	1542	18	60	
09/mai	6115	43,1	1167	1797	1977	13	48	
10/mai	5910	43,1	933	1420	2052	11	41	
11/mai	5953	43,0	1660	2543	1818	20	58	9,24
12/mai	5883	43,2	1515	2102	2135	16	50	
13/mai	6059	43,2	1718	2435	2330	18	51	9,64
14/mai	10082	43,1	1494	1987	3746	14	35	
15/mai	9432	42,9	1669	2342	2468	17	49	
16/mai	6741	43,1	2146	3133	2064	24	60	
17/mai	6046	43,0	2157	3143	1548	24	67	
18/mai	5847	43,0	2060	3057	941	24	76	
19/mai	5947	43,0	1881	2798	1416	22	66	
20/mai	6173	43,0	1721	2406	2085	19	54	
21/mai	6645	43,1	1127	1290	2565	11	33	
22/mai	7186	42,9	1466	1892	2366	15	44	
23/mai	5720	42,9	963	976	809	8	55	
24/mai	5280	43,0	698	611	2996	6	17	
25/mai	5949	43,1	1480	2033	2655	16	43	
26/mai	6116	43,0	1049	1197	2271	8	35	
27/mai	6102	42,5	815	856	2421	6	26	
28/mai	6236	42,8	834	856	2411	7	26	

Tabela C.2: Valores mínimos médios e máximos dos resultados inerentes à digestão anaeróbia.

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio Antes da Adição de Gorduras	Valor Médio Depois da Adição de Gorduras	Aumento Médio Percentual (%)
Biogás Produzido (m ³)	41,63	2189,0	737,7	1388,5	88,2
Energia Produzida (kWh)	0	4975,1	644,6	2048,7	217,8
Autossuficiência (%)	0	81,0	17,5	43,4	
pH	7,02	7,96		7,46	
Temperatura (°C)	34,5	43,2		40,3	
AGV/Alcalinidade (mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃)	0,07	0,12		0,10	