



Otimização do desempenho da codigestão anaeróbia tendo em vista o aumento da autossuficiência energética de uma ETAR da SIMDOURO

PEDRO GONÇALVES OLIVEIRA ROCHA

novembro de 2020

OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA TENDO EM VISTA O AUMENTO DA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA ETAR DA SIMDOURO

Pedro Gonçalves Oliveira Rocha
1180075

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA TENDO EM VISTA O AUMENTO DA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA ETAR DA SIMDOURO

Pedro Gonçalves Oliveira Rocha
1180075

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação da Doutora Sónia Adriana Figueiredo e coorientação da Doutora Nídia Caetano e Supervisão do Eng.º João Ramos

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Sónia Adriana Ribeiro da Cunha Figueiredo
Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutora Nídia de Sá Caetano
Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Supervisor

Engenheiro João Ramos
Coordenador da Exploração SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S.A.

Arguente

Doutor Rui Alfredo da Rocha Boaventura
Investigador do Laboratório Associado LSRE-LCM/FEUP

AGRADECIMENTOS

O Mestrado em Energias Sustentáveis culmina com a realização e conclusão desta dissertação, e para isso houve muitas pessoas que me ajudaram e contribuíram para que isto fosse possível, a quem eu presto o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Sónia Figueiredo e à Professora Doutora Nídia Sá Caetano, minha coorientadora, pela disponibilidade, por todo o apoio prestado, e pela partilha de conhecimento e inúmeras dúvidas esclarecidas, sem as quais não seria possível realizar este trabalho.

À SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S.A., em particular ao meu coorientador, o Eng.º João Ramos, pela oportunidade de realizar a dissertação de mestrado em contexto empresarial, e por todo o apoio prestado e disponibilidade em esclarecer dúvidas que foram surgindo ao longo do trabalho.

Agradeço à Eng.ª Fátima Meireles e à Eng.ª Ermelinda Barreiro por toda a ajuda prestada durante a realização prática da dissertação, pelos conselhos e disponibilidade. Agradeço também a todos os operadores da ETAR, pela disponibilidade e ajuda na recolha das diferentes amostras de lamas.

Aos meus amigos e colegas, por toda a ajuda e incentivo dado ao longo deste curso.

Por fim, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, irmão e avó, por estarem sempre comigo e me apoiarem nos momentos mais difíceis e acreditarem em mim, e por terem contribuído para que isto se tornasse realidade.

A todos, muito obrigado!

A Prof.^a Sónia Figueiredo, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LAQV/REQUIMTE – Laboratório Associado para a Química Verde/Rede de Química e Tecnologia, financiado pela FCT/ MCTES através de fundos nacionais (UIDB/50006/2020).

A Prof.^a Nídia de Sá Caetano, coorientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado pela Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2020 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia – LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

PALAVRAS CHAVE

Biogás; co-substrato; digestão anaeróbia; lama de ETAR, resíduo

RESUMO

Os resíduos sólidos, tais como lamas provenientes de uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR), resíduos de óleos e gorduras animais, e outros resíduos industriais, são de especial interesse, uma vez que podem ser usados como fontes para a produção de energia renovável.

O processo de digestão anaeróbia (DA) permite converter este tipo de resíduos/biomassa em biogás, que pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e térmica, sendo, no entanto, um processo complexo e dependente das propriedades da biomassa, assim como das condições aplicadas ao reator.

Neste contexto, o presente estudo foi realizado no âmbito da unidade curricular “Dissertação/Projeto/Estágio” do Mestrado em Energias Sustentáveis, numa ETAR pertencente ao grupo SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S.A.. O estágio teve como principal objetivo replicar à escala laboratorial o digestor anaeróbio existente na ETAR, e analisar a influência da incorporação de um resíduo sólido industrial rico em óleos e gorduras na quantidade de biogás produzido durante o processo de digestão anaeróbia a partir de lamas da ETAR. O resíduo incorporado é proveniente de uma empresa de valorização de gorduras e afins, para a produção de biodiesel.

Para este estudo procedeu-se à realização de diferentes ensaios em paralelo, em que as proporções de lamas de ETAR (neste caso uma mistura de lama primária e lama secundária) foram mantidas iguais às que se verificavam no digestor real, respetivamente 60% e 40%, variando a proporção de resíduo adicionado à mistura entre 1% e 7%, e tendo-se fixado a percentagem de inóculo, neste caso lama do digestor, em 50%.

Durante este estudo foi medido o volume de biogás produzido, ao longo do período de duração do ensaio que era de cerca de 15 dias, ou até a produção de biogás cessar. Procedeu-se também à caracterização físico-química das lamas, do resíduo sólido industrial (co-substrato) e da mistura presente em cada reator, tendo sido determinados os seguintes parâmetros, antes e depois de cada ensaio: pH, temperatura, sólidos totais, sólidos voláteis, matéria seca, matéria volátil, alcalinidade e ácidos gordos voláteis. A produção de biogás esperada para cada reator foi estimada a partir da degradação dos

sólidos voláteis (SV destruídos). No entanto, os resultados experimentais ficaram um pouco aquém do previsto com base na degradação dos sólidos voláteis, o que pode ser atribuído a processos de inibição causados por acumulação de ácidos gordos voláteis e por consequente abaixamento do pH, mas sem descartar a possibilidade de fugas na instalação laboratorial.

Comparando os diversos ensaios quanto à matéria volátil digerida, ou seja os valores de biogás esperados nos reatores em Branco e com os que continham resíduo, verificou-se que nos ensaios com 1%, 2% e 4% de resíduo, a adição de resíduos significou um potencial aumento de produção de biogás (quantidade de biogás esperado fruto da maior degradação de matéria volátil) em comparação com os reatores em branco correspondente, mas na prática não foi possível confirmar dado os problemas existentes na medição de biogás efetivamente produzido e a ocorrência de inibição em alguns reatores. Nos restantes ensaios, a adição de resíduo significou uma diminuição da quantidade de biogás esperado (menor degradação de matéria volátil) em comparação com a quantidade de biogás esperado nos reatores em branco correspondentes.

Os resultados obtidos neste estudo não foram conclusivos quanto ao efeito inibidor ou potenciador de formação de biogás na codigestão do resíduo.

KEYWORDS

Anaerobic digestion; biogas; co-substrate; residue; WWTP sludge

ABSTRACT

Solid waste, such as sewage sludge, from a wastewater treatment plant (WWTP), waste animal oils and fats, and other industrial wastes, are of particular interest, as they can be used as sources for renewable energy production.

The anaerobic digestion (DA) process allows this type of waste/biomass to be converted into biogas, which can be used for the production of electrical and thermal energy, but is a complex process and depends on the properties of the biomass as well as the conditions applied to the reactor.

In this context, the present study was carried out within the curricular unit "Dissertation/Project/Internship" of the Master's Degree in Sustainable Energy, in (WWTP), belonging to the SIMDOURO group - Saneamento do Grande Porto, S.A..

The main objective of the internship was to replicate at laboratory scale the anaerobic digester existing in the WWTP, and to analyze the influence of the incorporation of an industrial solid residue rich in oils and fats in the amount of biogas produced during the anaerobic digestion process from the WWTP sludge. The incorporated waste comes from a company that valuation fats and the like for the production of biodiesel.

For this study different tests were carried out in parallel, in which the proportions of WWTP sludge (in this case a mixture of primary sludge and secondary sludge) were kept the same as in the actual digester, respectively 60% and 40%, with the proportion of residue added to the mixture ranged between 1% and 7%, and the percentage of inoculum, in this case digester sludge, was set at 50%.

During this study, the volume of biogas produced was measured over the period of the test, which was about 15 days, or until the production of biogas ceased. Physicochemical characterization of the sludge, industrial solid residue (co-substrate) and the mixture present in each reactor was also carried out. The following parameters were determined before and after each test: pH, temperature, total solids, volatile solids, dry matter, volatile matter, alkalinity and volatile fatty acids. The expected biogas production for each reactor was estimated from the degradation of the volatile solids (SV destroyed). However, the experimental results were somewhat less than expected on the basis of the degradation of volatile solids, which can be attributed to inhibition processes caused

by accumulation of volatile fatty acids and consequent lowering of the pH, but without ruling out the possibility of leaks in the laboratory installation.

Comparing the various tests regarding the digested volatile matter, namely the biogas values expected in the blank tests and those that contained residue, it was verified that in the tests with 1%, 2% and 4% of residue, the addition of residue meant a potential increase in biogas production (higher quantity of biogas was expected due to the greater degradation of volatile matter) compared to the corresponding blank reactor, but in practice it was not possible to confirm it given the problems in the measurement of biogas actually produced and the occurrence of inhibition in some reactors. In the remaining tests, the addition of residue meant a decrease in the amount of biogas expected (lower degradation of volatile matter) compared to the amount of biogas expected in the corresponding blank reactors.

The results obtained in this study were not conclusive concerning the inhibitory or potentiating effect of biogas formation in the codigestion of the residue.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AGV	Ácidos Gordos Voláteis
BMP	<i>Biochemical methane potential</i>
BMTP	<i>Biochemical Methane Potential Tester</i>
C	Carbono
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
DA	Digestão Anaeróbia
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FOG	<i>Fat, Oil and Grease</i>
LB	Lama Biológica
LCFA	<i>Long Chain Fatty Acids</i>
LP	Lama Primária
N	Nitratos
MS	Matéria Seca
MV	Matéria Volátil
OFMSW	<i>Organic fraction of municipal solid waste</i>
OLR	<i>Organic loading rate</i>
PS	<i>Primary Sludge</i>
SMP	<i>Specific Methane Potential</i>
SRT	<i>Sludge retention time</i>
SS	<i>Sewage Sludge</i>
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
UASB	<i>Upflow anaerobic sludge blanket</i>
UE	União Europeia
VS	<i>Volatile Solids</i>
WAS	<i>Waste Activated Sludge</i>
WWTP	<i>Wastewater Treatment Plant</i>

Lista de Unidades

ktoe	Kilo tonelada equivalente de petróleo
------	---------------------------------------

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Biogás	Produto resultante da digestão anaeróbia, composto principalmente por metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂)
Codigestão	Digestão anaeróbia de misturas de resíduos orgânicos de diferentes origens e características
Digestão anaeróbia	Degradação biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio
FOG	Termo usado para se mencionar a camada de material rico em lípidos das águas residuais geradas durante a cozedura e o processamento de alimentos
Gases de efeito de estufa	Qualquer gás que tem a propriedade de absorver a radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra e irradiar de volta para a Terra. Inclui o dióxido de carbono, metano e vapor de água.
Substrato	Qualquer substância que contenha uma quantidade significativa de matéria orgânica, passível de ser convertida biologicamente em biogás

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 VISTA AÉREA DA ETAR	3
FIGURA 1.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ETAR	3
FIGURA 2.1 ESQUEMA DAS ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA “ADAPTADA DE [9]”	8
FIGURA 2.2 ESQUEMA DE UM DIGESTOR MONOESTÁGIO [17]	11
FIGURA 2.3 ESQUEMA DE UM DIGESTOR EM DUAS ETAPAS [17]	12
FIGURA 2.4 ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE DIGESTOR DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS [17]	13
FIGURA 2.5 DIGESTÃO ANAERÓBIA COM A ADIÇÃO DE FOG [22]	22
FIGURA 3.1 VISTA DO INTERIOR E EXTERIOR DO DIGESTOR DA ETAR	27
FIGURA 3.2 ESQUEMA DA MONTAGEM DA INSTALAÇÃO	29
FIGURA 4.1 EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DO ENSAIO COM 1%.....	39
FIGURA 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO DOS REATORES BRANCOS E COM RESÍDUO (1%)	40
FIGURA 4.3 EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DO ENSAIO COM 2% DE RESÍDUO	41
FIGURA 4.4 COMPARAÇÃO DO BIOGÁS ESPERADO DO REATOR BRANCO E COM RESÍDUO (2%).....	42
FIGURA 4.5 EVOLUÇÃO DA QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO – 1º TESTE	43
FIGURA 4.6 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO DOS REATORES BRANCOS E COM 3% DE RESÍDUO – 1º TESTE.....	44
FIGURA 4.7 QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DA DURAÇÃO DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO – 2º TESTE	45
FIGURA 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADOS DOS REATORES BRANCOS E COM 3% DE RESÍDUO -2º TESTE	46
FIGURA 4.9 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO NOS REATORES BRANCO E COM 4% RESÍDUO	48
FIGURA 4.10 QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DA DURAÇÃO DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 1º TESTE	49
FIGURA 4.11 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO DOS REATORES BRANCOS E COM 5% DE RESÍDUO	50
FIGURA 4.12 QUANTIDADE DE BIOGÁS PRODUZIDO AO LONGO DA DURAÇÃO DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 2º TESTE	51
FIGURA 4.13 COMPARAÇÃO DO BIOGÁS ESPERADO ENTRE OS REATORES BRANCOS E COM 5% DE RESÍDUO – 2º TESTE	52
FIGURA 4.14 COMPARAÇÃO DO BIOGÁS ESPERADO ENTRE O REATOR BRANCO E COM 5% RESÍDUO - 3ºTESTE.....	53
FIGURA 4.15 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO DO REATOR BRANCO E COM RESÍDUO 7%	55
FIGURA 4.16 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS ESPERADO DOS REATORES BRANCOS E COM RESÍDUO, COM A QUANTIDADE MÁSSICA DO RESÍDUO	55

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA PRIMÁRIA PROVENIENTE DE BIOGÁS NA UE (2016) "ADAPTADO [10]"	7
TABELA 2.2 DIFERENTES PROCESSOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA USADOS INDUSTRIALMENTE [1]	14
TABELA 2.3 ESTUDOS REALIZADOS COM FOG [31]	21
TABELA 2.4 ESTUDOS EM QUE FORAM USADOS FOG COMO CO-SUBSTRATO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA [37]	23
TABELA 2.5 COMPARAÇÃO DE ESTUDO DE CODIGESTÃO DE LAMA DE ETAR E FOG [38]	23
TABELA 3.1 PROPORÇÕES DOS CONSTITUINTES A USAR NOS ENSAIOS	29
TABELA 4.1 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS (CONTENDO FOG) UTILIZADOS	38
TABELA 4.2 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 1% DE RESÍDUO	38
TABELA 4.3 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO NO ENSAIO COM 1% DE RESÍDUO	39
TABELA 4.4 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 2% DE RESÍDUO	41
TABELA 4.5 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 2% DE RESÍDUO	41
TABELA 4.6 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO – 1º TESTE	43
TABELA 4.7 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO – 1º TESTE	43
TABELA 4.8 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO -2º TESTE	45
TABELA 4.9 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 3% DE RESÍDUO -2º TESTE	45
TABELA 4.10 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 4% DE RESÍDUO	47
TABELA 4.11 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 4% DE RESÍDUO	47
TABELA 4.12 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 1º TESTE	48
TABELA 4.13 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 1º TESTE	49
TABELA 4.14 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 2º TESTE	50
TABELA 4.15 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO – 2º TESTE	50
TABELA 4.16 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO -3º TESTE	52
TABELA 4.17 COMPARAÇÃO ENTRE O BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO NO ENSAIO COM 5% DE RESÍDUO - 3º TESTE	52
TABELA 4.18 PARÂMETROS LABORATORIAIS DO ENSAIO COM 7% DE RESÍDUO	54
TABELA 4.19 VALORES DE BIOGÁS PRODUZIDO E ESPERADO DO ENSAIO COM 7% DE RESÍDUO	54

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Âmbito e motivação.....	1
1.2	Objetivo do trabalho	2
1.3	Local de estágio.....	2
1.3.1	SIMDOURO.....	2
1.3.2	Localização da ETAR.....	2
1.4	Organização do trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Caraterísticas gerais do processo da digestão anaeróbia.....	7
2.1.1	Etapas da digestão anaeróbia.....	8
2.2	Sistemas da digestão anaeróbia	10
2.2.1	Operação monoestágio (estágio único).....	10
2.2.2	Operação bietápica (duas etapas)	12
2.2.3	Digestores em vários estágios (ou múltiplos estágios)	13
2.3	Produtos da digestão anaeróbia	14
2.3.1	Biogás.....	15
2.3.2	Produto digerido (lama digerida)	15
2.4	Codigestão anaeróbia	15
2.4.1	Tipos de substrato usados na codigestão anaeróbia	16
2.5	Codigestão de lama de ETAR com FOG.....	18
3	DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	27
3.1	Descrição do funcionamento do digestor anaeróbio da ETAR	27
3.2	Descrição do funcionamento da instalação laboratorial	28
3.3	Recolha das amostras	31
3.4	Caraterização das lamas	31
3.4.1	pH e Temperatura.....	31
3.4.2	Sólidos Totais (ST)	31
3.4.3	Sólidos Voláteis (SV)	32
3.4.4	Matéria Seca (MS).....	32
3.4.5	Matéria Volátil (MV)	32

3.4.6	Alcalinidade (ALC)	33
3.4.7	Ácidos Gordos Voláteis (AGV).....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Resíduo.....	37
4.2	Ensaio com 1% de resíduo	38
4.3	Ensaio com 2% de resíduo	41
4.4	Ensaio com 3% de resíduo	42
4.4.1	3% de resíduo – 1º teste.....	42
4.4.2	3% de resíduo – 2º teste.....	45
4.5	Ensaio com 4% de resíduo	47
4.6	Ensaio com 5% de resíduo	48
4.6.1	5% de resíduo – 1º teste.....	48
4.6.2	5% de resíduo – 2º teste.....	50
4.6.3	5% de resíduo – 3º teste.....	52
4.7	Ensaio com 7% de resíduo	54
4.8	Comparação dos resultados para as diferentes concentrações de resíduo.....	55
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	60
	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	65
	ANEXOS	71
	ANEXO A – Cálculo da proporção de lamas nos ensaios	71
	ANEXO B – Cálculo da quantidade total de biogás esperado	73
	ANEXO C – Cálculo da quantidade mássica do resíduo	75

INTRODUÇÃO

- 1.1 Âmbito e motivação
- 1.2 Objetivo do trabalho
- 1.3 Local de estágio
- 1.4 Descrição da ETAR
- 1.5 Organização do trabalho

1 INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito e motivação

Um dos objetivos energéticos a atingir num futuro próximo, é uma maior utilização de energia proveniente de fonte renovável, de maneira a diminuir a dependência da utilização de energia proveniente de combustíveis fósseis. Esta mudança justifica-se devido ao seu elevado custo e eminente esgotamento, bem como, ao consequente aumento da emissão de gases de efeito de estufa e poluentes para a atmosfera, que estão na origem das alterações climáticas sentidas ao longo dos anos [1].

Neste sentido, a União Europeia (UE) tem vindo a propor medidas de mitigação para todos os estados membros, promovendo o uso de energias renováveis. O Protocolo de Quioto, foi o primeiro tratado jurídico internacional que propunha medidas para limitar as emissões de gases com efeito de estufa dos países desenvolvidos e foi assinado pelas nações que com ele se comprometeram em 1997 [2]. A mais recente meta decretada em conjunto pelos estados membros, foi estabelecida a partir de uma proposta de reformulação da Diretiva relativa à Promoção da Utilização de Energia proveniente de Fontes Renováveis, tendo como objetivo atingir cerca de 32% para o uso de energia com origem em fontes de energia renovável até 2030 [3].

Das diferentes fontes de energia renovável existentes, há uma que se tem destacado mais nos últimos anos que é a biomassa, permitindo o seu aproveitamento energético quer a partir da sua combustão direta, quer a partir da formação de biogás [4] que pode ser armazenado para utilização posterior. Este biocombustível resulta de um processo chamado digestão anaeróbia (DA), que consiste na degradação da matéria orgânica na ausência de oxigénio.

O processo de co-digestão anaeróbia pode ser aplicado à valorização de diferentes biomassas, com principal enfoque na valorização de lamas provenientes das estações de tratamento de águas residuais (ETAR), permitindo assim uma melhor gestão das lamas, através da produção de biogás e possibilitando também a eliminação de microrganismos patogénicos.

O presente trabalho surge no âmbito da dissertação de Mestrado de Energias Sustentáveis, e tem por finalidade avaliar o desempenho do processo de co-digestão anaeróbia numa Estação de Tratamento de Águas Residuais, tendo em vista o aumento da sua autossuficiência.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho centra-se na análise da otimização do processo de co-digestão anaeróbia de lamas produzidas numa ETAR e de um resíduo de uma empresa produtora/extratora de óleos e gorduras residuais usado principalmente para a produção de biodiesel. Para esse fim, as lamas e o resíduo foram sujeitos a uma caracterização físico-química, e realizados ensaios laboratoriais de co-digestão de lamas e resíduo em diversas proporções, tendo ainda sido avaliada a produção do biogás. Por fim, foi também elaborado um conjunto de propostas que permitam aumentar a produção de biogás, tendo como principal objetivo a autossuficiência da ETAR.

1.3 Local de estágio

1.3.1 SIMDOURO

A SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S.A., tem como compromisso contribuir ativamente para o desenvolvimento sustentado e para a concretização das metas estabelecidas para o setor do saneamento, considera e promove os interesses de todas as partes interessadas, assumindo como princípios estratégicos a satisfação do cliente, a motivação dos colaboradores, a gestão responsável dos processos, a melhoria contínua e inovação e a comunicação de desempenho [5], [6].

A SIMDOURO, tem como função conceber, construir e gerir as infraestruturas do Sistema Multimunicipal de Saneamento do Grande Porto, garantindo a prestação de serviços de saneamento de águas residuais aos municípios aderentes, através da utilização de processos de recolha e tratamento eficientes, num quadro de sustentabilidade económica, social e ambiental. Este sistema multimunicipal está dimensionado para servir uma população de cerca de 519 mil habitantes equivalentes e tratar 86 893 m³/dia de águas residuais urbanas (efluentes domésticos e industriais), provenientes dos municípios utilizadores, no ano horizonte do projeto (2060) [5], [6].

1.3.2 Localização da ETAR

A ETAR em estudo é a ETAR de Gaia Litoral que se observa na Figura 1.1 [7], localiza-se na freguesia de Canidelo como se vê na Figura 1.2 [8], tendo como função principal o tratamento de efluentes provenientes das partes Norte e Ocidental do concelho de Vila Nova de Gaia.



Figura 1.1 Vista aérea da ETAR



Figura 1.2 Localização geográfica da ETAR

Esta ETAR é tida como uma das melhores e mais sofisticadas da Europa, e entrou em atividade em maio de 2003, com dimensão para servir uma população de 300 000 habitantes equivalentes no ano de horizonte do projeto, sendo o caudal médio de tratamento e o caudal de ponta de 66 700 m³/dia e 1 177 m³/dia, respetivamente. O

processo de tratamento baseia-se num sistema de tratamento por lamas ativadas em regime de média carga [7].

1.4 Organização do trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. No capítulo 1 é apresentado o âmbito e são definidos os objetivos do trabalho, apresentando-se ainda o local de estágio. O capítulo 2 consiste numa revisão bibliográfica, onde são referidos temas como a digestão anaeróbia, codigestão e o uso de gordura e lamas na produção de biogás. No capítulo 3 é descrito o caso de estudo, e seguidamente os materiais e métodos usados, identificando os parâmetros que foram analisados ao longo do trabalho. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados ao longo do trabalho. Por fim, no capítulo 5 são abordadas as principais conclusões do trabalho e apresentadas algumas sugestões de melhoria para trabalho futuro.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Caraterísticas gerais do processo da digestão anaeróbia
- 2.2 Sistemas da digestão anaeróbia
- 2.3 Produtos da digestão anaeróbia
- 2.4 Codigestão anaeróbia
- 2.5 Codigestão de lama de ETAR com *FOG*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caraterísticas gerais do processo da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é uma sucessão de processos biológicos em que um conjunto de bactérias diversificadas decompõem matéria orgânica, transformando-a em biogás, nomeadamente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é uma combinação de efluentes sólidos e líquidos, que são digeridos na ausência de oxigénio (via anaeróbia). A matéria orgânica provém de compostos biodegradáveis resultantes dos restos ou decomposição de organismos anteriormente vivos, como animais e plantas e seus resíduos. A matéria orgânica usada na digestão anaeróbia compreende lamas de laticínios, resíduos de processamento de alimentos, resíduos de plantas e outros resíduos orgânicos, como águas residuais urbanas (incluindo as lamas aí geradas), resíduos alimentares, gorduras e óleos. A digestão anaeróbia apresenta assim diversos benefícios, que vão desde a redução de odor, ao melhoramento da qualidade do ar, recolha de biogás que diminui a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera e permite originar energia (combustível, eletricidade, calor) que pode ser vendida ou usada nas próprias instalações [9].

Na Tabela 2.1 encontra-se representada o ranking de países com maior produção de energia primária a partir de biogás, na União Europeia (UE) no ano de 2016.

Tabela 2.1 Produção de energia primária proveniente de biogás na UE (2016) "adaptado [10]"

Nº	Ranking de Países da UE	Quantidade de energia produzida a partir de biogás em ktoe (2016)
1	Alemanha	7 956,3
2	Reino Unido	2 406,9
3	Itália	2 028,9
4	República Checa	601,0
5	França	579,6
18	Portugal	80,3

Observa-se que a Alemanha é o país que tem maior produção de biogás, o qual é maioritariamente produzido em unidades de codigestão. Portugal tem uma produção

anual de 80,3 ktoe (kilo tonelada equivalente de petróleo), que têm origem principalmente na produção em aterros sanitários [10].

2.1.1 Etapas da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é um método complexo que consiste em 4 etapas, que compreendem a hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese, respetivamente [1], [11]. Sendo que em cada etapa, estão presentes diferentes microrganismos ativos, onde trabalham em sequência, e onde um conjunto de microrganismos é suporte de outros microrganismos a seguir, exceto quando é o produto final (metano). Portanto, os microrganismos metanogénicos precisam de estar sincronizados e em equilíbrio, não existindo esse equilíbrio entre os microrganismos leva a um processo de inibição (acidificação) no digestor [12].

Na DA, cada etapa tem diferentes características, conforme é apresentado de seguida e como se pode observar na Figura 2.1.

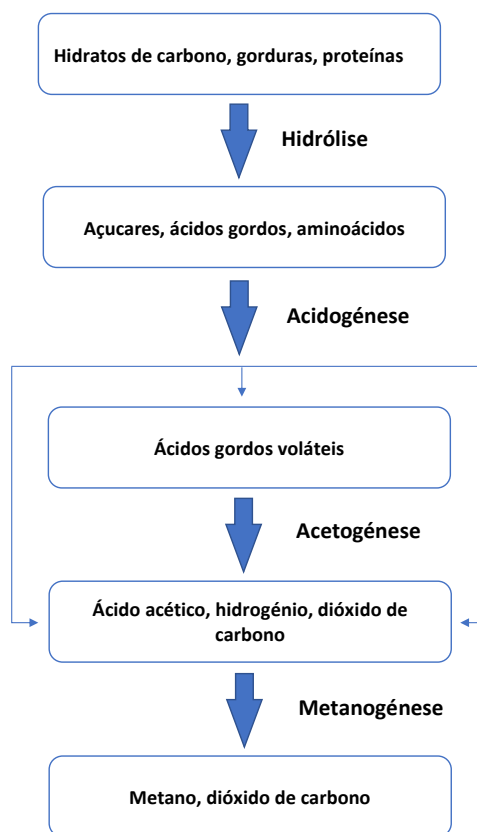


Figura 2.1 Esquema das etapas da digestão anaeróbia “adaptada de [9]”

A primeira etapa, a hidrólise, acontece quando enzimas extracelulares geradas por microrganismos hidrolíticos (por exemplo, celulase, amílase, protéase e lípase) transformam polímeros orgânicos complexos em monómeros simples e solúveis usando água para quebrar as ligações químicas, a equação da reação encontra-se representada pela Eq. (2.1). As proteínas são divididas em aminoácidos, lipídios em ácidos gordos de

cadeia longa e curta, amido em glicose e carboidratos em açúcares [9], [13]. Certos componentes de substratos, como exemplo da celulose e da queratina, quando presentes tornam a hidrólise numa etapa limitante da digestão anaeróbia [12].



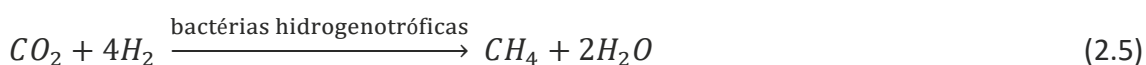
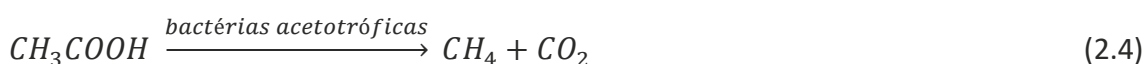
Na etapa de acidogénese, as pequenas moléculas decorrentes da hidrólise são transformadas por microrganismos acidogéneos (bactérias fermentativas) em uma mistura de ácidos gordos voláteis (AGVs), como ácidos acético, propiónico e butírico e outros produtos menores, como hidrogénio, dióxido de carbono. A acidogénese normalmente é a etapa mais rápida na conversão anaeróbia de matéria orgânica complexa em fase líquida, pois as condições de pH afetam claramente a formação de AGVs [9], [11]. A acidogénese é representada pela Eq.(2.2).



A acetogénese, converte a maioria dos produtos da acidogénese (hidrogénio e dióxido de carbono) em ácido acético, Eq. (2.3) [11].



A etapa da metanogénese interpreta o papel mais importante na produção de metano. Existem dois mecanismos principais para a produção de metano, que são a metanogénese acetoclástica e hidrogenotrófica. Sendo que as bactérias acetotróficas fermentam o ácido acético gerando CH_4 e CO_2 , Eq. (2.4), e as bactérias hidrogenotróficas usam CO_2 e H_2 como substratos, conforme indicado na Eq. (2.5) [11].



Uma digestão anaeróbia estável exige um equilíbrio entre as diferentes populações microbianas. As etapas de hidrólise e acidogénese têm os micróbios mais importantes (produtores de ácido), que crescem na mais ampla faixa ambiental. Eles reagem depressa ao aumento da disponibilidade de alimentos, logo a concentração de ácidos gordos pode aumentar muito rapidamente. A escala de pH é mantida em condições normais pela solução-tampão presente no sistema, neste caso o bicarbonato (HCO_3^-). Porém, se a concentração de ácido ultrapassar a capacidade de tamponamento do sistema, o valor do pH pode vir a ficar fora dos limites admissíveis para as bactérias acetogénicas e metanogénicas (produtoras de metano). Quando isso se verifica, a

produção de metano cessa, e os níveis de ácido aumentam acima do nível de tolerância dos produtores de ácido, resultando em falha do sistema [9].

À exceção do pH, a temperatura é um fator preponderante pois afeta o equilíbrio entre as populações microbianas. Alterações súbitas de temperatura afetam os microrganismos produtores de metano, influenciando também os produtores de ácido. Qualquer alteração que tenha um efeito prejudicial sobre os produtores de metano aumenta a concentração de ácido, o que, por sua vez, delimita a sua atividade [9].

2.2 Sistemas da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia tem sido utilizada para a transformação de matéria orgânica biodegradável, a partir de diferentes sistemas de reatores, onde o sistema mais simples contém um reator que é responsável por realizar as quatro etapas da digestão, que é chamado de sistema de digestão de estágio único (operação monoestágio). Com o avanço da ciência e da biotecnologia, descobriu-se que cada etapa da digestão tem condições ótimas de crescimento distintas [14], [15], logo a ideia da separação física das etapas de digestão (digestão múltiplos estágios) tem como finalidade melhorar o controle sobre cada etapa de modo a alcançar o máximo desempenho de conversão. Atualmente, os sistemas de digestão de vários estágios abrangem apenas sistemas de dois e três estágios. No sistema de dois estágios, a hidrólise, e a acidogénese/acetogénese são realizadas num reator e a metanogénese é realizada noutro reator. Mais complexo, o sistema de três estágios realiza a hidrólise, acidogénese / acetogénese e metanogénese em diferentes reatores [11]. Os digestores anaeróbios podem ser classificados nas seguintes categorias [16]:

- estágio único;
- bietápicos;
- múltiplos estágios;

A temperatura de digestão indica o regime de operação: mesofílico ou termofílico. O teor de sólidos indica o regime de carga de operação: alta carga, baixa carga, média carga. O tipo de reator utilizado pode ser contínuo, descontínuo, ou semi-contínuo.

2.2.1 Operação monoestágio (estágio único)

Na operação monoestágio, distintos grupos de microrganismos são desenvolvidos no mesmo ambiente, de acordo com o fluxo dos substratos disponíveis no sistema. A digestão anaeróbia convencional de estágio único não é aquecida ou agitada. O material presente sofre decomposição em um estado “estático”, e o substrato líquido tende a estratificar-se numa camada sólida estabilizada, uma camada de digestão ativa, uma camada sobrenadante e uma camada de espuma [17]. Pode-se observar na Figura 2.2 um digestor de operação monoestágio.

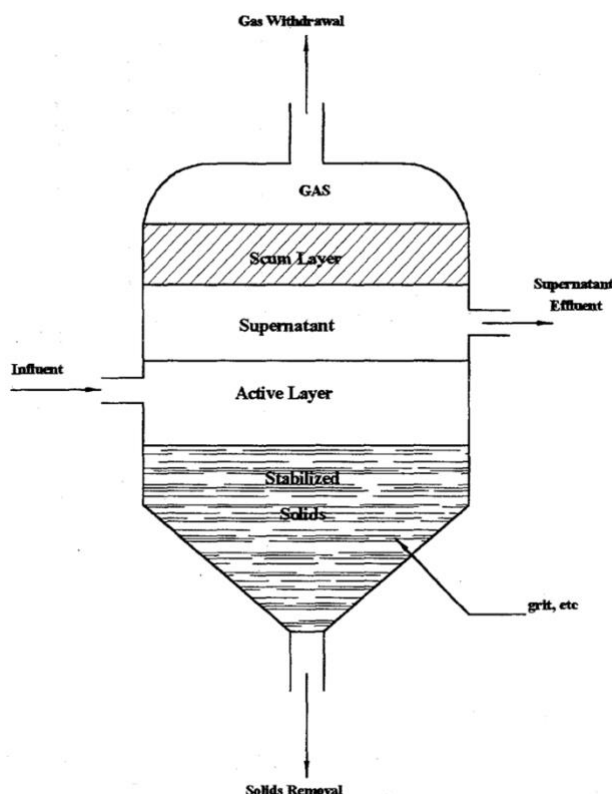


Figura 2.2 Esquema de um digestor monoestágio [17]

Numa digestão estável, cada grupo de bactérias determinará o seu próprio tamanho populacional, o que, por sua vez, variam com a matéria orgânica presente, com as condições operacionais (pH, temperatura, tempo de retenção) e com a estequiometria da reação envolvida. Problemas associados a baixa carga orgânica, longo tempo de retenção, baixa eficiência, devem ser solucionados para criar um processo de digestão de estágio único bem-sucedido. A alteração mais importante é o aumento do contato entre os microrganismos e o substrato presente na mistura. Outros problemas que obrigam a uma atenção indispensável envolvem a eliminação da camada de lamas, manutenção de temperaturas constantes em todo o tanque de digestão, inibição da sedimentação de partículas com dimensões elevadas, controlo aperfeiçoado do processo e retirada de potenciais inibidores metabólicos, como ácidos gordos voláteis. As variações de carga, pH e concentração de sólidos da matéria-prima podem influenciar a estabilidade do sistema. Se a produção de ácido for maior do que a produção de metano, isso significa que há um acumular de AGVs, devendo-se interromper o sistema e esperar até estabilizar. Devido ao elevado tempo de retenção necessário e à sua baixa eficiência, este género de operação é excecionalmente usado. No entanto, a operação monofásica pode ainda ser utilizada em reatores paralelos ou em reatores em série (estágios múltiplos) pois são uma ótima solução para resolver os problemas mencionados anteriormente [11], [17].

2.2.2 Operação bietápica (duas etapas)

A operação em duas fases consiste na decomposição anaeróbia em duas fases distintas, a formação de ácidos e a formação de metano, que podem ser efetuadas em dois reatores separados em série. A matéria orgânica é decomposta em fases distintas, ou seja, numa primeira fase por bactérias anaeróbias formadoras de ácido, e posteriormente, por metanogénicas que ajudam a converter os ácidos gordos voláteis produzidos durante a primeira fase em biogás. As bactérias metanogénicas relacionadas convertem ácido acético e hidrogénio em metano e dióxido de carbono. A separação é possível porque o mecanismo das duas fases é diferente [17].

Diversos investigadores têm afirmado que a digestão em duas fases tem várias vantagens em comparação a digestão em estágio único, e que a separação de fases permite um aumento de teor de metano no biogás produzido [18], [19]. Igualmente foi verificado experimentalmente que a separação de fases é essencial nos casos em que a formação de ácidos é tão rápida que leva à anulação da metanogénese no reator de acidificação por baixos valores de pH, altas concentrações de AGVs e curtos tempos de retenção.

Pode-se assegurar que a operação bietápica pode ser aplicável a todos os tipos de resíduos, com maior eficiência de tratamento utilizando reatores com tamanho total reduzido. Os resíduos que possuem sulfato podem ser processados por operação em duas fases para superar a toxicidade causada pelo sulfureto de hidrogénio. A presença de materiais dificilmente biodegradáveis ou tóxicos nos resíduos pode ser minimizada pela operação em duas etapas, como por exemplo no caso do tratamento de resíduos da indústria de papel e celulose [17]. Pode-se observar este tipo de sistemas na Figura 2.3.

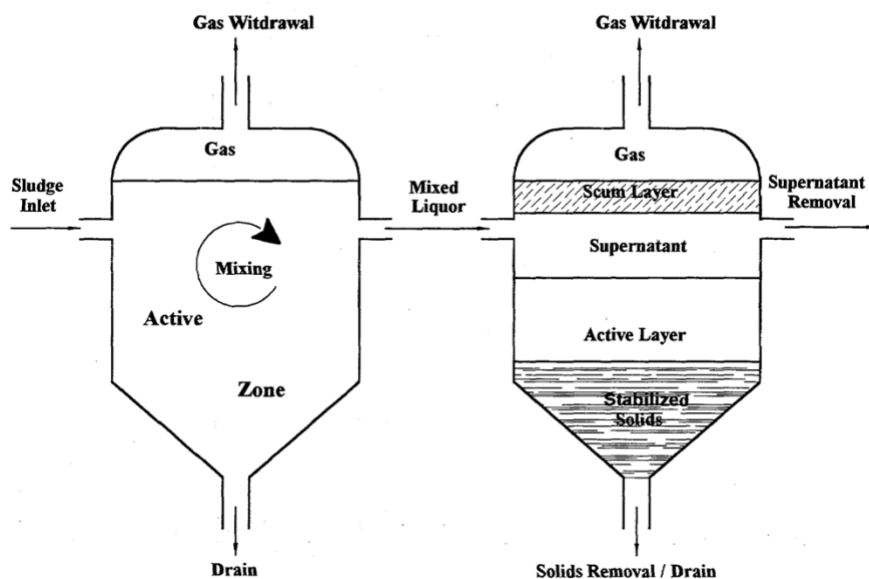


Figura 2.3 Esquema de um digestor em duas etapas [17]

2.2.3 Digestores em vários estágios (ou múltiplos estágios)

O conceito de digestor de múltiplos estágios é baseado no facto de que a digestão anaeróbia não é apenas um processo de duas etapas, mas um processo de várias etapas envolvendo diferentes bactérias, tendo como função principal a degradação de polímeros de cadeia longa. Sendo que as condições ambientais ideais para os microrganismos mudam de um grupo para outro, é essencial que várias reações biológicas aconteçam separadamente sob diferentes condições ambientais [17].

Na digestão de múltiplos estágios, uma diferenciação é feita entre os reatores com e sem retenção de biomassa no segundo estágio. A intenção da retenção de biomassa é permitir altas densidades celulares na formação de metano. A utilização deste sistema permite a retenção de biomassa dentro do reator, que é uma variável importante na estabilidade biológica do digestor. Existem duas maneiras básicas de alcançar a retenção de biomassa, a primeira é aumentar o teor de sólidos no reator separando o tempo de retenção hidráulico e de sólidos, e recirculação e a segunda é o crescimento associado, onde a biomassa é imobilizada num suporte inerte, como rocha ou plástico, presente no interior do reator. Uma condição importante a ser executada nestes reatores, é a remoção dos sólidos em suspensão após o primeiro estágio [16].

O sistema de digestão de múltiplos estágios mais usado consiste numa série de reatores com agitação contínua, controlados para fornecer variação de temperatura e pH. Um digestor de vários estágios mais sofisticado foi projetado, desenvolvido e experimentado por Restrepo [20], em Itália, como se pode observar na Figura 2.4. Com base no trabalho realizado até ao momento em digestores de múltiplos estágios, pode-se afirmar que, o sistema permite aumentar o rendimento em biogás, mas os problemas económicos associados ainda são elevados.

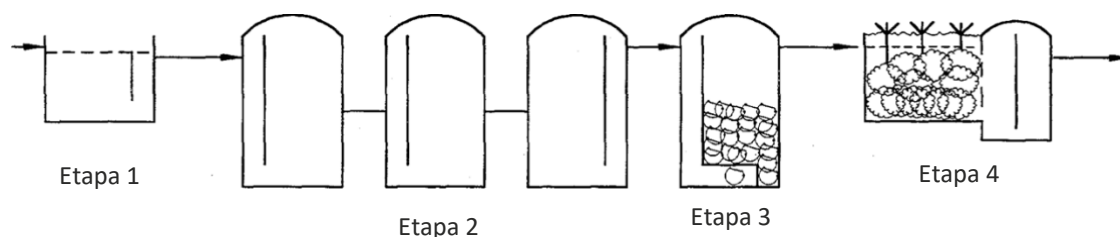


Figura 2.4 Esquema de funcionamento de digestor de múltiplos estágios [17]

O método de operação mais usado atualmente em Portugal ainda é a digestão em apenas um digestor, apesar de estarem a aumentar as unidades de tratamento com mais de um estágio. Os processos de DA podem ser ainda executados em três e quatro estágios para separação das fases, a fim de aumentar as reações de digestão, no entanto, não são utilizados pois o rendimento alcançado em biogás não é significativo comparativamente com processos em dois estágios, e além do mais apresenta custos elevados [1]. Na Tabela 2.2 são apresentadas algumas das condições operatórias mais utilizadas a nível industrial com processos de DA.

Tabela 2.2 Diferentes processos de digestão anaeróbia usados industrialmente [1]

Modo de Operação	Condições de Operação	Observações
Um estágio	Gama mesofílica (30-40°C); SRT=20 dias;	60% redução SV; operação mais simples e de baixo custo;
Dois estágios (Termofílico – Mesofílico)	Digestor primário - gama termofílica (50-60 °C) - SRT=5; Digestor secundário - gama mesofílica (30-38 °C) - redução de sólidos voláteis; SRT=10 dias;	Eliminação de patogênicos; Auxilia ainda na desintegração dos compostos acelerando o processo de DA e aumentando o consumo de sólidos voláteis; Diminuição do mau odor;
Dois estágios: Digestão ácida - Produção de biogás	Digestor primário - ambiente ácido; SRT= 1 a 2 dias Digestor secundário - pH neutro - SRT=10 dias	Digestor primário: hidrólise ácida (1 dia); Algum biogás é formado com menos qualidade do que no digestor secundário; Digestor secundário: acetogénese e metanogénese;
Dois estágios: Digestão com recirculação da biomassa	Digestor primário- Gama mesofílica e pH neutro Digestor secundário- separação sólido-líquido	No digestor primário ocorre a formação de biogás; no digestor secundário há separação de fases ocorrendo recirculação da biomassa, que potencia a produção de biogás;

2.3 Produtos da digestão anaeróbia

Os produtos resultantes da digestão anaeróbia são o biogás, formado essencialmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), e o produto digerido (lama digerida), é composto por matéria orgânica, incluindo biomassa microbiana [21].

2.3.1 Biogás

O biogás apresenta uma composição química que pode variar conforme a matéria-prima usada. Os valores médios da composição do biogás são [21]:

- i. 60 a 70% de metano (CH_4);
- ii. 30 a 40% de dióxido de carbono (CO_2);
- iii. Vestígios de outros gases, tais como, oxigénio (O_2), azoto (N_2), sulfureto de hidrogénio (H_2S), amoníaco (NH_3), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV).

A densidade relativa do biogás produzido é cerca de 0,86. Devido a presença de CO_2 , o valor de PCI (poder calorífico inferior) varia entre 21-25 MJ/ m^3 , cerca de 30 a 40% inferior ao valor do gás natural que é de cerca de 37,3 MJ/ m^3 . A partir da percentagem de metano existente no gás, pode ser determinado o seu poder calorífico. Quanto mais elevado for o poder calorífico, maior vai ser o potencial energético, isto vêm de uma maior quantidade de metano presente no biogás. As unidades produtoras de biogás são dotadas de filtros para reduzir a quantidade de partículas finas no gás, e permite a remoção de partículas, teor de gotas de água e espuma. O biogás é um combustível com um diverso número de aplicações, que vão desde da produção de calor e vapor de água, geração de energia elétrica/cogeração, uso como combustível de veículos e, podendo também ser usado como matéria-prima para a produção de outros produtos químicos [21].

2.3.2 Produto digerido (lama digerida)

O produto digerido é composto por resíduos e pelos próprios microrganismos, que não foram digeridos, por exemplo, fibras das camas dos animais ou da alimentação, entre outros resíduos. O produto digerido, de acordo com a legislação portuguesa, é um resíduo que deve ser valorizado, por exemplo através de um processo de compostagem, dando origem a um fertilizante, com um valor agronómico e ambiental considerável [21].

2.4 Codigestão anaeróbia

A codigestão é um processo que permite a alimentação do digestor a partir de resíduos orgânicos de diferentes fontes e características, permitindo assim reduzir a ocorrência de variações nas condições operatórias. Ou seja, misturas de resíduos que separadamente não permitiriam obter uma produção de biogás, podem dar origem a biogás com boa qualidade, superando assim muitas lacunas do processo de digestão tradicional, como [22]:

- i. Produção de misturas com uma ótima relação C/N;
- ii. Diluição de compostos potencialmente tóxicos e inibitórios;
- iii. Suprimento de capacidade tampão da mistura;

- iv. Aumento do conteúdo biodegradável dos resíduos;
- v. Ampliação da gama de bactérias que participam no processo.

Aglomerados de partículas, materiais flutuantes e resíduos com propriedades distintas podem ser facilmente digeridos, depois de misturados com outros substratos. A mistura será mais homogênea se existirem substratos líquidos ou com elevado teor de água, como, por exemplo, lamas ou lixiviados.

Em questões económicas, o tratamento de resíduos por codigestão pode ser benéfico, se a quantidade de resíduos orgânicos gerados individualmente, não serem suficientes para permitir a elaboração de um sistema de digestão anaeróbia. Deste modo, a elaboração de uma unidade central de codigestão pode ser a melhor solução [21].

2.4.1 Tipos de substrato usados na codigestão anaeróbia

Substrato é qualquer substância que contém uma quantidade significativa de matéria orgânica, suscetível de ser convertida em biogás [24].

As características dos substratos usados têm grande influência nos aspetos tecnológicos e de operação dos sistemas anaeróbios como, na qualidade dos produtos finais: o biogás e a lama digerida. Na digestão anaeróbia, podem ser usados diversos tipos de substratos, nomeadamente resíduos como lamas resultantes do tratamento de águas residuais (domésticas ou industriais), resíduos não comestíveis de culturas alimentares, resíduos de atividades agropecuárias, resíduos de óleos e gorduras animais, fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e efluentes resultantes da atividade industrial [21].

No âmbito deste trabalho é dado particular ênfase aos resíduos de óleos e gorduras animais, lamas de ETAR e resíduos industriais, pois o objetivo desta dissertação é a otimização da codigestão das lamas de ETAR com um resíduo proveniente de uma empresa produtora de biodiesel, rico em óleos e gorduras.

2.4.1.1 Resíduo de óleo e gorduras animais

Os resíduos ricos em lípidos (óleos e gorduras) são gerados em grandes quantidades pela indústria de processamento de alimentos congelados, indústria de óleo alimentar, indústria de laticínios e lagares de azeite, sendo muitas das vezes os componentes principais e mais problemáticos no conjunto de resíduos gerados por este tipo de indústria. Os lípidos em concentrações elevadas acarretam diferentes tipos de problemas nos digestores anaeróbicos que vão desde do entupimento, acumulação de gorduras e inibição de crescimento microbiano devido à presença de ácidos gordos de cadeia longa. Desta forma, estes materiais são sempre codigeridos com outros substratos para reduzir a sua concentração no digestor. Contudo, vários estudos têm apontado que a digestão de materiais com elevado teor de lípidos, aumenta o rendimento de metano [24]. Por exemplo, os excrementos foram reconhecidos como sendo o melhor material para ser codigerido com os resíduos que contêm elevado teor

de gordura, devido à sua elevada alcalinidade, o que aumenta a resistência do conteúdo do digestor à acidificação, devido à formação de ácidos gordos voláteis [21], [25].

2.4.1.2 Lamas de ETAR

A valorização das lamas produzidas durante o tratamento de águas residuais é um problema de elevada importância, pois representa até 50% dos custos operacionais atuais de uma ETAR [21], [26].

A digestão anaeróbia é usualmente considerada como uma tecnologia económica e amiga do ambiente para o tratamento de grandes quantidades de lamas, uma vez que permite reduzir cerca de 40% da carga orgânica total dos resíduos. Outras funções associadas a digestão anaeróbia é a estabilização das lamas, a melhoria da desidratação das mesmas e o potencial para a inativação e redução dos microrganismos patogénicos. A sua digestão permite assim reduzir os custos operacionais de uma ETAR, tendo em conta o grande potencial de produção de biogás onde a sua composição depende da mistura existente na digestão anaeróbia [21].

2.4.1.3 Resíduos industriais

A utilização da digestão anaeróbia representa um grande potencial em indústrias produtoras de resíduos orgânicos, especialmente nas indústrias alimentares. Permitindo assim reduzir os custos com o destino final das lamas biológicas, com as taxas de tratamento de resíduos nos sistemas municipais e controlar odores. Posteriormente podem também utilizar o biogás produzido para substituir alguns combustíveis usados na unidade industrial, ou para a produção de energia elétrica ou térmica. As tecnologias de digestão anaeróbia começaram por ser aplicadas nas indústrias de processamento de bebidas e alimentos, que até hoje utilizam o tratamento anaeróbio nos seus resíduos. Existem ainda muitos resíduos que não estão a ser valorizados e acabam por ser depositados em aterros [21].

Em diferentes estudos elaborados [27]–[29], confirmou-se que no mercado central de distribuição de alimentos (carne, peixe, frutas e legumes) de Barcelona, a quantidade total de resíduos produzidos é cerca de 90 toneladas por dia, durante 250 dias por ano. Já num mercado na Tunísia é de 180 toneladas por mês e na Índia compõem cerca de 5,6 milhões de toneladas por ano, sendo esses resíduos depositados nas periferias das cidades. A alta carga de matéria orgânica biodegradável, bem como a alta humidade, simplifica o seu tratamento biológico. A digestão anaeróbia dos resíduos de frutas e vegetais permite a conversão de 70 a 95% da matéria orgânica em metano. Estes estudos demonstram um melhoramento da digestão anaeróbia, a partir da utilização destes resíduos. Uma das principais limitações deste processo biológico associado aos resíduos de frutas e vegetais é a acidificação rápida, o que leva a uma rápida produção de ácidos gordos voláteis e a diminuição do pH, causando assim a inibição das bactérias metanogénicas. Antes de serem adicionados nos digestores, sofrem habitualmente

alguns pré-tratamentos sendo em geral triturados em partículas de menores dimensões e homogeneizados para facilitar a digestão. O pré-tratamento da matéria orgânica proveniente de resíduos de fruta e vegetais a elevadas temperaturas aumenta a eficácia da sua digestão anaeróbia [21].

Diversas indústrias têm tido uma utilização crescente da digestão anaeróbia, no tratamento dos seus resíduos.

2.5 Codigestão de lama de ETAR com *FOG*

A codigestão anaeróbia foi identificada como uma abordagem eficaz, de baixo custo e economicamente viável para aumentar a produção de biogás em digestores anaeróbios de ETARs. Foi indicado em vários estudos que a gordura, o óleo e a gordura de resíduos orgânicos (*FOG – fat, oil and grease*) de origens distintas poderiam ser aproveitados como um substrato potencial na codigestão das lamas do processo de tratamento de águas residuais, com o objetivo de aumentar a produção de metano, uma vez que o *FOG* permite um aumento no rendimento de metano, que outros resíduos orgânicos não permitem [30].

FOG é um termo usado para se mencionar à camada de material rico em lípidos das águas residuais geradas durante a cozedura e o processamento de alimentos. A libertação direta de *FOG* no sistema de saneamento é considerada ilegal, na maioria dos países. O *FOG* pode-se aglomerar nas paredes dos tubos, potencialmente criando incrustações por meio de uma reação química ou de uma aglomeração física. Estes sedimentos levam a uma diminuição na capacidade de transporte e, por fim, ao entupimento dos esgotos. Dado este risco, foram implementadas etapas de pré-tratamento para ajudar na remoção da gordura dos resíduos da cozinha nas ETARs. Os dispositivos de captura de gordura são usualmente dispositivos de separação por gravidade, não automatizados, que capturam a gordura em suspensão e os sólidos alimentares, fornecendo tempo suficiente para flotação/sedimentação dos resíduos importantes [31].

Independentemente dos benefícios associados a codigestão, estudos que investigam a digestão anaeróbia de resíduos lipídicos de alta resistência também descreveram uma ampla diversidade de desafios operacionais. Esses desafios operacionais compreendem a inibição de bactérias acetoclásticas e metanogénicas, limitação do transporte de substratos e produtos, flotação das lamas, formação de espuma no digestor, bloqueios de tubagens e bombas e entupimento dos sistemas de recolha e manuseamento de gás. Até hoje persistem imensas preocupações operacionais na implementação da codigestão anaeróbia de *FOG* com a lama primária e secundária, onde a inibição da geração de metano é a mais comum. A codigestão anaeróbia de *FOG* tem sido regularmente escrita nos últimos anos, onde não existe referência sobre preocupações com inibições ou o potencial de inibição durante a codigestão anaeróbia. Diversos

estudos realizados até ao momento convergem na aplicação de tecnologias anaeróbias de alto rendimento para o tratamento de resíduos industriais com elevado teor de lípidos, onde normalmente se utilizam reatores anaeróbios de fluxo ascendente (*UASBs-Upflow anaerobic sludge blanket*) [31].

Existem inúmeros artigos publicados na última década, apresentando alternativas e implementações bem-sucedidas da codigestão anaeróbia de lama de ETAR e resíduos contendo *FOG*. Em 2008, foram feitos os primeiros ensaios referente a utilização de *FOG* como co-substrato na DA, onde reatores descontínuos e contínuos foram operados em condições mesofílicas com taxas de carga orgânica (OLR's) variando de 2,4-2,7 kg-SV / m³·d, descobrindo que a adição de lama rica em gordura à lama de ETAR faz aumentar o potencial de metano e o rendimento em metano. Nos testes piloto, o rendimento em metano aumentou 9-27% para as quantidades de lama de gordura correspondentes a 10-30% do total de SV adicionado. Estes foram os primeiros de diversos ensaios que impulsionaram a pesquisa na área da codigestão anaeróbia de lama municipal e resíduos contendo *FOG* [22], [32].

No mesmo ano, foram publicados estudos com base no uso de resíduos constituídos por *FOG* desidratado como co-substrato juntamente com a lama de ETAR. Estas descobertas tiveram como base estudos em sistema descontínuo (*batch*) e semi-contínuo em condições mesofílicas e termofílicas, com uma OLR variando de 2,2 a 4,35 kg-SV / m³·d. A análise do potencial bioquímico de metano mostrou que a produção de metano normalizada para g-SV_{FOG} destruído foi mais alta para o reator com 18% de *FOG* embora tenha ocorrido maior destruição de SV, cerca de 46,9%, no reator que continha 58% de *FOG*. No entanto, uma vez que a mistura foi aclimatada por períodos mais longos, a quantidade superior de metano obtida foi produzida pelo reator com 58% da porção *FOG*. A formação de AGVs foi baixa, indicando um processo de degradação muito eficaz. Relativamente aos ensaios realizados em condições termofílicas e OLR de 4,35 g-SV / L·d, foi alcançada maior destruição de SV% do que em condições mesofílicas (51,2% vs 45,0%). Também, a adição de *FOG* aumentou o rendimento em metano em 2,6 vezes (197 mL vs 512 mL CH₄) no regime termofílico e 2,95 vezes (152 mL vs 449 mL CH₄) em condições mesofílicas, respetivamente [22], [33], [34].

Um outro estudo teve como objetivo avaliar a influência da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (*OFMSW - Organic Fraction of Municipal Solid Waste*) e de *FOG* como co-substratos. O funcionamento do digestor em 2 OLRs diferentes (2 kg-SV / m³·d e 4,5 kg-SV / m³·d) e tempo de retenção de sólidos (*SRTs - Solids Retention Time*) (16 dias e 14,5 dias). A partir dos resultados obtidos nos testes de potencial bioquímico de metano (*BMP- Biochemical methane potential*), a mistura com 15% de *FOG* foi escolhida para a operação semi-contínua, a codigestão com *FOG* aumentou a produção de biogás em 72% e o rendimento em metano em 46%, quando comparado à digestão com *OFMSW* sozinho [22], [35].

Uma variedade mais ampla de resíduos relacionados com *FOG* tem vindo a ser estudada, como é o caso do uso de resíduos de gordura não desidratada como co-substrato num

estudo realizado em digestor mesofílico semi-contínuo de 5,25 L operado com 15 dias SRT e OLR variando de 1,74-3,14 g-SV / L.d. constatou-se que a produção de biogás aumentava constantemente com o aumento da carga de resíduos de gordura em até 46%, mas reduzia assim que a carga era aumentada para 70%. Aliás, o teor de metano aumentou de 61% para 69%, verificou-se também o aumento de AGV (5466 mg-AGV / L no digestor 1 e 5569 mg-AGV / L no digestor 2) e redução média do pH de 7,55 para 5,5. A atividade do digestor foi inibida e a recuperação do digestor foi efetuada a partir da alimentação de lama de ETAR durante 22 dias (permitindo a sua recuperação, que se verificou com o aumento do pH e da produção de biogás) [22], [36].

Alguns estudos realizados encontram-se descritos resumidamente na Tabela 2.3, e com representação gráfica na Figura 2.5.

Tabela 2.3 Estudos realizados com FOG [31]

Origem da lama	Fonte de FOG	Produção inicial de biogás	Produção máxima de biogás	% de aumento = (produção de biogás no reator de controlo/produção de biogás com FOG) - 100%.	Concentração de FOG na produção máxima de gás	Configuração do reator	Temperatura	Tempo de retenção de sólidos	Referências
50% de lama secundária, 50% de lama primária de ETAR	Lama de retenção de gordura	325 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	681 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	109	60% SV	Reator de potencial de metano em descontínuo	Mesofílica	-	[32]
50% de lama secundária, 50% de lama primária de ETAR	Lama de retenção de gordura	271 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	344 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	27	30% SV	Reator alimentado uma vez por dia	Mesofílica	10-13 Dias	[32]
Lama primária e secundária de ETAR	Amostra de FOG desidratada	151 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	415 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	175	41% SV	Teste de biodegradabilidade em descontínuo	Mesofílica	-	[34]
Lama primária e secundária espessadas de ETAR	Polímeros de FOG desidratação de gordura.	159 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	473 (mL CH ₄ /g SV adicionados)	197	48% SV	Duas fases: 1L - fase ácida; 4L - fase metanogénica	Mesofílica	fase ácida -1 dia fase metanogénica - 12 dias	[33]

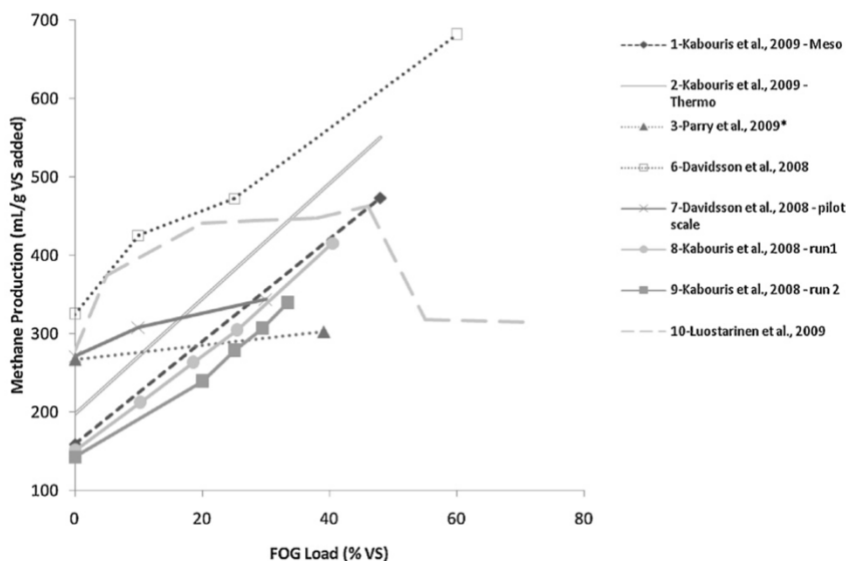


Figura 2.5 Digestão anaeróbia com a adição de *FOG* [22]

Alguns estudos que usam *FOG* como co-substrato na codigestão anaeróbia de lama de águas residuais foram resumidos na Tabela 2.4. Os estudos de codigestão com *FOG* são comparativamente mais completos do que com outros co-substratos. Os resultados mostram um rendimento em metano significativamente superior, variando entre 13 a 198%. A maioria dos estudos mostra que o uso de lama de ETAR e *FOG* (50:50) apresentam um maior rendimento em metano, atingindo cerca de 0,50 L CH₄/gSV adicionados. Uma percentagem superior (por exemplo, mais de 60 % SV do resíduo de retenção de *FOG* / gordura) resultaria em acumulação de biomassa e, portanto, geraria uma limitação no processo devido ao aumento da presença de ácidos gordos voláteis nos agregados de biomassa. O elevado conteúdo de ácidos gordos voláteis nos resíduos de *FOG* devido à degradação de materiais ricos em lípidos é um notório inibidor de bactérias metanogénicas, que geralmente provocam um atraso entre a degradação de ácidos gordos voláteis e a produção de metano levando a problemas operacionais como entupimento e formação de resíduos. A codigestão com lama de ETAR ajuda a dissolver e reduzir os ácidos gordos voláteis inibidores, pois estas possuem carboidratos e/ou proteínas que permitem reduzir a inibição [37].

Existem outros estudos que tem sido efetuados onde também utilizam como co-substrato *FOG* na co-digestão com lama de ETAR, que serão comparados na Tabela 2.5 onde grande parte desses estudo foram feitos a partir de diferentes fontes que vão desde de *FOG* proveniente de fábricas de processamento de carnes, de resíduos de captura de gordura de restaurantes (em condições mesofílicas), água residuais de gordura e óleos de restaurantes (digeridos em condições mesofílicas), verificando-se que o *FOG* pode vir de fontes principais que são processos industriais e da ETAR que vai fazer a codigestão [38].

Tabela 2.4 Estudos em que foram usados FOG como co-substrato da digestão anaeróbia [37]

Substrato primário	Co-substrato	%SV(v/v)	Temperatura	Tempo de retenção (dias)	% de produção de metano	Referências
Lama de ETAR	FOG	52:48	Mesofílica	12 / 13	198	[33]
		95:5	Mesofílica		169	
		80:20	Termofílica		34	
Lamas ativadas espessadas	FOG	36:64	Mesofílica	15	137	[39]
		93:7		30	-32	
		83:13		24	26	
		85:15		25	23	
Lamas ativadas espessadas	FOG	60:40	Termofílica	60	43	[40]
		40:60			56	
		20:80			-68	

Tabela 2.5 Comparação de estudo de codigestão de lama de ETAR e FOG [38]

Lamas/Substrato	Proporção de mistura (%)	Temperatura (°C)	Tipo de digestor	OLR (kgSV/m³)	SMP (m³ CH ₄ /kgSV)	Melhoramento/inibição	Referências
PS:WAS (74:26) + FOG	100:0	35	CSTR	1,90 (VS)	0,56 (VS)	-	[41]
PS:WAS (74:26) + FOG	80:20	35	CSTR	2,90 (VS)	0,98 (VS)	×1,75	[41]
PS:WAS + FOG	40:60	35	CSTR	3,10 (VS)	1,72 (VS)	×3,07	[41]
PS:WAS (74:26) + FOG	60:40	35	CSTR	3,50 (VS)	1,72 (VS)	×2,55/LCFA	[41]
PS:WAS (74:26) + FOG	70:30	35	CSTR	1,60 (VS)	0,35 (VS)	Reduzido	[41]
SS + FOG	77:23	35	CSTR	1,60 (VS)	0,37 (VS)	×1,48	[42]
SS + filtro de gorduras	77:23	36	CSTR	1,58 (VS)	0,63 (VS)	×2,55/LCFA 30%	[43]
PS:WAS (50:50) + FOG	100:0	35	CSTR	3,0 (VS)	0,83	-	[32]
PS:WAS (50:50) + FOG	90:10	35	CSTR	3,0 (VS)	1,08	×1,3	[32]
PS:WAS (50:50) + FOG	100:0	52	CSTR	2,5 (VS)	0,68	Reduzido por ×1,3	[32]
PS:WAS (50:50) + FOG	90:10	52	CSTR	2,4 (VS)	0,83	Igual	[32]
PS:WAS (50:50) + FOG	70:30	52	CSTR	4,45 (VS)	2,23	×2,70	[32]
SS + FOG	36,6:63,6	35	CSTR	11 (CQO)	0,31 (CQO)	-	[44]
WAS + FOG	64:36	37	CSTR	2,34 (VS)	0,60 (VS)	×2,37	[39]
WAS + FOG	48:52	36	CSTR	1,2 (VS)	0,55 (VS)	×2,07 / 74%	[45]
SS + óleo usado	80:19,4	38	CSTR	0,91 (VS)	0,47 (VS)	Inibição em 53%	[46]
SS + FOG	99,8:0,2	34	CSTR	0,77 (VS)	0,30 (VS)	Adsorção	[47]
SS + FOG	34,5:65,5	37	CSTR	2,16 (VS)	0,75 (VS)	×4,18/inibição 83,5%	[48]

Notas: *PS* - lamas primárias (*primary sludge*), *WAS*- lamas ativadas em excesso (*waste activated sludge*) ; *SS*- lama de depuração (*sewage sludge*), *CSTR*- reator perfeitamente agitado contínuo (*continuous stirred tank reactor*) , *VS*- sólidos voláteis (*volatile solids*), *SMP*- potencial específico de metano (*specific methane potential*), *LCFA*-ácidos gordos de cadeia longa (*long chain fatty acids*)

A realização desta dissertação tinha como principal objetivo analisar qual a proporção de um resíduo contendo (*FOG*) a adicionar ao digestor real da ETAR de modo a poder proporcionar um aumento significativo na produção de biogás, sem que causasse problemas ao digestor. Anteriormente foi adicionada uma carga elevada de resíduo ao digestor, o que causou entupimentos de tubagem, excesso de espumas e até mesmo transbordo da mistura presente no digestor, e sendo que não tinham sido feitos estudos prévios para perceber qual a proporção ideal. Daí o principal objetivo da realização deste estágio ser estudar a proporção ótima de resíduo a adicionar ao digestor, a partir da realização de ensaios à escala laboratorial, de modo a verificar que não ocorressem problemas de funcionamento no digestor e proporcionassem um aumento na produção de biogás.

DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

- 3.1 Descrição do funcionamento do digestor anaeróbio da ETAR
- 3.2 Descrição do funcionamento da instalação laboratorial
- 3.3 Recolha das amostras
- 3.4 Caracterização das lamas

3 DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1 Descrição do funcionamento do digestor anaeróbio da ETAR

A ETAR está equipada com dois digestores anaeróbios (Figura 3.1), sendo cada um deles construído em betão com parede dupla, de forma cilíndrica, com fundo cónico e de cobertura fixa em betão armado, que se encontram parcialmente enterrados afim de permitir o seu assentamento num solo resistente e minimizar o gradiente de temperatura entre as lamas presentes no seu interior e a temperatura exterior. O processo de digestão anaeróbia efetua-se em dois estágios [49]:

- Acidogénese/Acetogénese com produção de ácidos gordos voláteis (AGV), sobretudo ácido acético;
- Metanogénese com formação de metano (CH_4)

Encontra-se apenas um digestor em funcionamento, operando em condições mesofílicas, à temperatura de cerca de 40 °C, e o tempo de retenção hidráulico é de 18 dias.

O volume total (útil) do digestor é de 4000 m³, do qual diariamente são extraídos 300 m³ de lamas digeridas e simultaneamente são alimentados 300 m³ de lama mista. Destes 300 m³ alimentados diariamente, correspondem à lama primária e à lama secundária, em proporções relativas de 60% (v/v) e 40% (v/v), e onde se juntam 22 m³ correspondente ao resíduo rico em óleos e gorduras (efluente industrial/FOG).



Figura 3.1 Vista do interior e exterior do digestor da ETAR

3.2 Descrição do funcionamento da instalação laboratorial

Com o objetivo de otimizar o funcionamento do digestor anaeróbio, no que se refere à produção de biogás a partir da codigestão do resíduo contendo *FOG* como co-substrato, foi construída uma instalação laboratorial (*scale-down*) que permitisse simular o funcionamento do digestor real e permitisse observar o impacto resultante da utilização de diferentes proporções de resíduo como co-substrato na alimentação ao digestor.

Para tal, foram montados reatores descontínuos (*batch*), com o objetivo de estudar a produção de biogás obtida em resposta a diversas proporções de resíduo adicionadas à carga inicial, realizando-se ensaios com reatores contendo resíduo (em triplicado) e reatores em branco (em triplicado) como controlo do processo, para o primeiro ensaio, sendo que nos restantes ensaios se manteve a mesma metodologia, mas já não foi possível manter ensaios em triplicado, passando assim a ensaios em duplicado.

O inóculo é constituído por lama digerida do digestor da ETAR, introduzida em iguais quantidades nos diferentes reatores, sendo que é salientar que o inóculo já estará aclimatado ao resíduo que o digestor recebe periodicamente. Quanto ao substrato, este era constituído por lama primária e secundária (lama mista), no caso do branco, e por lama primária, lama secundária (sempre nas mesmas proporções relativas, respetivamente 60 e 40 % (v/v)) e resíduo, em diferentes proporções, no caso dos restantes reatores.

Na observação da composição dos substratos foram usadas as seguintes condições: os reatores em branco continham 50% (v/v) de inóculo, sendo esta percentagem inferior ao que se verifica no digestor real (para permitir assim uma melhor avaliação do efeito da adição do resíduo), e 50% (v/v) de lama mista (nas proporções relativas 60%(v/v) de lama primária e 40% (v/v) de lama secundária), e no caso dos reatores com resíduo eram compostos também por 50% (v/v) de inóculo, 49,5% a 46,5% (v/v) de lama mista (com a mesma composição relativa de lama primária, 60% (v/v) e lama secundária, 40% (v/v)), e resíduo com proporções a variarem entre 0,5 e 3,5% (v/v), em termos de % global no reator (correspondendo a 1 a 7% (v/v)) em termos relativos numa base isenta de inóculo, equivalente à alimentação do reator. As proporções presentes nos reatores usados nos ensaios encontram-se descritas na Tabela 3.1, sendo a % usada na designação dos ensaios equivalente à % de resíduo presente na alimentação. O cálculo destas proporções em volume encontra-se no anexo A.

Tabela 3.1 Proporções dos constituintes a usar nos ensaios

Reatores	Inóculo (lama digestor) (%)	Lama Mista		Co-substrato (FOG) (%)
		Lama Primária (lama biológica) (%)	Lama Secundária (lama flotada) (%)	
Branco	50	30	20	-
1% FOG	50	29,7	19,8	0,5
2% FOG	50	29,4	19,6	1
3% FOG	50	29,1	19,4	1,5
4% FOG	50	28,8	19,2	2
5% FOG	50	28,5	19	2,5
7% FOG	50	27,9	18,6	3,5

A mistura dos diferentes constituintes de cada reator era realizada num frasco à parte, sendo preparado um volume em excesso para se poderem retirar amostras para análise dos parâmetros físico-químicos iniciais em cada reator.

A temperatura de funcionamento dos reatores, encontrava-se na gama entre 39,5 e 40,5 °C, controlada através de um banho termostático. A agitação era proporcionada por uma placa de agitação magnética (*Selecta*).

O funcionamento desta instalação piloto não pode ser comparado diretamente com o do digestor real presente na ETAR, pois não contempla a recirculação de lamas, ou seja, são reatores descontínuos sem alimentação, por isso, o tempo de retenção, a produção de gás, entre outras vertentes não serão proporcionais ao reator real.

Os reatores usados na instalação piloto têm uma capacidade de 500 mL, sendo que o volume utilizado foi de 400 mL. Na Figura 3.2 pode-se observar o esquema da montagem/funcionamento da instalação.

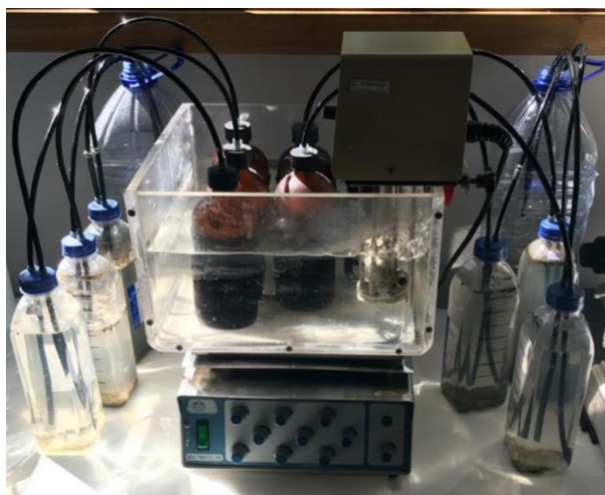


Figura 3.2 Esquema da montagem da instalação

A montagem e operação desta instalação foi baseada num estudo realizado em 2019, onde o objetivo era estudar o digestor anaeróbio de lamas de uma outra ETAR da SIMDOURO [50].

A instalação era composta por 6 reatores (frascos de 500 mL), conectados a 6 garrafas de 1 L previamente graduadas e cheias com água até perfazerem 1 L, permitindo a realização de 1 ensaio em triplicado, ou 5 em duplicado. A ligação entre o reator (frasco) e a garrafa, era feita por tubo de silicone flexível com 3 mm de diâmetro e que ficava submerso dentro da garrafa de água. Na garrafa existia uma ligação para o exterior, encontrando-se também submersa na água, para permitir o movimento da água, aquando da produção do biogás. É de salientar que estas conexões têm que estar devidamente seladas para evitar ao máximo qualquer fuga de biogás, e para isso utilizou-se uma anilha de tubo de silicone, colocada entre o furo da rolha do frasco e o tubo usado para a ligação à garrafa, e além disso as rolhas foram devidamente vedadas com silicone, para reduzir ao mínimo as fugas de biogás.

Esta instalação encontrava-se submersa num banho equipado com uma resistência de aquecimento acoplada a um regulador de temperatura.

O banho com os reatores estava colocado sobre uma placa de agitação magnética que promovia a agitação contínua e independente de cada um dos reatores.

Para a medição da produção de biogás, era feita a leitura do nível de água presente na garrafa ao fim de 24 horas do início do ensaio, e assim sucessivamente ao longo da duração do ensaio. A determinação da produção de biogás, era feita a partir da diferença entre a quantidade total de água em cada garrafa e os volumes de água lidos diariamente. Ao longo do tempo, o volume de água dentro da garrafa ia reduzindo, enquanto que o volume de biogás ia aumentando, até deixar de haver movimento de água, o que significava que não estava a ocorrer a produção/libertação de biogás e que o ensaio deveria ter terminado. Quando se verificava uma produção de biogás igual ao volume de água presente na garrafa, está teria de ser novamente cheia com água.

Para cada ensaio realizado neste modelo de instalação, foram retiradas amostras do conteúdo inicial e final de cada reator para posterior caracterização, no que se refere aos parâmetros pH, temperatura, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), matéria seca (MS), matéria volátil (MV), alcalinidade (ALC) e ácidos gordos voláteis (AGV).

No fim de cada ensaio eram colocados novos reatores, e água em cada garrafa para dar início a um novo ensaio. O intervalo de tempo utilizado para todos os ensaios, foi o mesmo para permitir uma comparação mais direta dos valores obtidos, ou seja, aproximadamente 15 dias, ou antes disso, quando se verificava que não ocorria mais produção de biogás.

A necessidade de montar reatores em triplicado ou em duplicado serviu para ajudar na comparação de valores e, em caso de não concordância, se se identificasse a origem do problema ou problemas, poderia excluir-se apenas esse ensaio e salvaguardar-se os restantes resultados.

3.3 Recolha das amostras

As amostras de lama primária (LP) ou lama espessada, lama biológica (LB) ou lama flotada e lama do digestor (usada como inóculo) foram obtidas na ETAR, sendo recolhidas no início de cada ensaio. Já o resíduo contendo *FOG* era obtido a partir da última carga transportada para a ETAR, da qual era recolhida uma amostra de 500 mL e armazenada no frigorífico até à sua utilização.

3.4 Caraterização das lamas

Os seguintes parâmetros foram avaliados para caraterizar as amostras de lamas e resíduos recolhidas na ETAR. As técnicas usadas para os analisar são descritas de seguida.

- i. pH e Temperatura
- ii. Sólidos Totais (ST)
- iii. Sólidos Voláteis (SV)
- iv. Matéria Seca (MS)
- v. Matéria Volátil (MV)
- vi. Alcalinidade (ALC)
- vii. Ácidos Gordos Voláteis (AGV)

3.4.1 pH e Temperatura

O pH é medido usando um medidor de pH (*Phoenix, EC-30*), previamente calibrado que fornece o valor de pH e temperatura de uma determinada amostra. Para diferentes tipos de lamas e para a fase líquida existem valores de referência definidos pela ETAR, a que o pH deve obedecer, de uma forma geral, devendo estar compreendidos entre 6,5 e 8.

3.4.2 Sólidos Totais (ST)

Os Sólidos Totais representam a matéria orgânica e mineral, dissolvida e em suspensão, presente em cada amostra. Para a sua determinação é necessário preparar previamente todos os cadinhos a ser usados, colocando-os numa mufla a 550 °C durante 15 min, e posteriormente são dispostos num exsicador durante 30 min até arrefecerem para serem pesados vazios (P1). Um volume medido rigorosamente (V) de cada amostra, de 25 ml, foi adicionado a cada cadinho, sendo posteriormente levados à estufa a 105 °C, onde permanecem por um período nunca inferior a 24 horas.

Após esse período, os cadinhos são retirados e deixados num exsicador durante 30 min e finalmente são pesados (P2). O teor de ST é calculado de acordo com a equação 3.1.

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P1-P2}{V} \times 1000 \quad (3.1)$$

Os valores devem ser inferiores a 40 000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

3.4.3 Sólidos Voláteis (SV)

Para a determinação do teor de Sólidos Voláteis, SV, segue-se o mesmo procedimento que é descrito para os ST, sendo que depois dos cadinhos saírem da estufa, são arrefecidos no exsicador e pesados, e são colocados de novo na mufla a 550 °C onde permanecem durante 2 h, e após está ultima passagem na mufla são colocados num exsicador durante 30 min para arrefecer e posteriormente serem pesados (P3). O cálculo para o teor de SV é dado pela equação 3.2.

$$SV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P2-P3}{V} \times 1000 \quad (3.2)$$

Os valores devem ser inferiores a 23 000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

3.4.4 Matéria Seca (MS)

Para a determinação da matéria seca, é necessário preparar previamente todos os cadinhos a ser usados, onde são colocados na estufa a 105 °C, durante um período mínimo de 1 hora, posteriormente é pesado o cadinho e registado o seu peso (P1). De seguida é medido um volume de cerca de 25 mL para o cadinho e registado o seu peso (P2). Coloca-se então o cadinho numa estufa a 105 °C até a secura total da amostra, nunca num período inferior a 24 horas. Retira-se da estufa e deixa-se arrefecer num exsicador. Posteriormente, pesa-se o cadinho com o resíduo seco e regista-se o seu peso (P3). O cálculo da MS é dado pela equação 3.3.

$$\%MS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P3-P1}{P2-P1} \times 100 \quad (3.3)$$

3.4.5 Matéria Volátil (MV)

Para a determinação da matéria volátil utiliza-se o cadinho com o resíduo da determinação da matéria seca, que é levado a calcinar numa mufla a 550 °C durante 2 horas, ao final de desse tempo retira-se o cadinho da mufla e coloca-se num exsicador para arrefecer, posteriormente é pesado o cadinho (P4). O cálculo da MV é dado pela equação 3.4.

$$\%MV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P3-P4}{P2-P1} \times 100 \quad (3.4)$$

3.4.6 Alcalinidade (ALC)

A determinação do teor de alcalinidade das lamas, *ALC*, é importante devido à informação que fornece relativamente à capacidade de neutralização de ácidos que se pretende durante a digestão anaeróbia, de forma a maximizar a produção de biogás. Para a determinação deste parâmetro começa-se por medir rigorosamente 25 ml de lama para o tubo da centrifuga (*Selecta, Centronic-BL*) e centrifuga-se essa lama, a 5000 rpm durante 20 min. Após a centrifugação, é recolhido o líquido sobrenadante num gobelé, e adiciona-se 50 ml de água destilada à lama centrifugada, sendo esta lama novamente centrifugada a 5000 rpm durante 20 min, e posteriormente recolhe-se o sobrenadante final para o gobelé. Para a determinação da alcalinidade, coloca-se o sobrenadante em agitação recorrendo a um agitador magnético e regista-se o pH. Titula-se com H_2SO_4 (0,1 N) até atingir pH = 4. Regista-se o volume gasto (V_1) e continua-se com a titulação até pH = 3,5, para posterior determinação dos AGVs. O cálculo para a determinação da alcalinidade é dado pela equação 3.5.

$$\text{Alcalinidade} \left(\frac{mgCaCO_3}{L} \right) = V_1 \times 4 \times 0,05 \times 1000 \quad (3.5)$$

Os valores devem estar compreendidos entre 4000 e 6000 mg/L, de acordo com os valores de referência do laboratório.

3.4.7 Ácidos Gordos Voláteis (AGV)

Os AGV permitem avaliar o potencial para a produção de ácido acético. Para a sua determinação ferveu-se o sobrenadante a pH = 3,5 (resultante da determinação da alcalinidade) durante 3 min, deixou-se arrefecer à temperatura ambiente, e posteriormente colocou-se em agitação a partir de um agitador automático. Titulou-se com NaOH (0,1 N) até atingir pH = 4, e registou-se o volume gasto V_2 , e continuou-se a titular até pH = 7, voltando-se assim a registar o volume gasto V_3 . O cálculo para a determinação dos ácidos gordos voláteis é dado pela equação 3.6.

$$\text{Ácidos Gordos Voláteis} \left(\frac{mgCH_3COOH}{L} \right) = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06 \times 1000 \quad (3.6)$$

De acordo com o plano operacional da ETAR, os valores obtidos devem ser inferiores a 500 mg_{CH_3COOH}/L .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 4.1 Resíduo
- 4.2 Ensaio com 1% de resíduo
- 4.3 Ensaio com 2% de resíduo
- 4.4 Ensaio com 3% de resíduo
- 4.5 Ensaio com 4% de resíduo
- 4.6 Ensaio com 5% de resíduo
- 4.7 Ensaio com 7% de resíduo
- 4.8 Comparação dos resultados para as diferentes concentrações de resíduo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante este trabalho foram realizados seis ensaios, em reator descontínuo (*batch*), para estudar a produção de biogás a partir da codigestão de resíduos. Foram utilizadas lamas mistas da alimentação ao digestor, inóculo de lama de digestor da ETAR e um resíduo de origem industrial, composto essencialmente por gordura (*FOG*). Os ensaios seguiram metodologias idênticas, com distinção apenas na concentração de resíduo presente em cada ensaio.

O primeiro ensaio, realizou-se com 1% de resíduo onde foram preparados seis reatores. Três destes reatores contendo apenas lama mista (reator branco) e outros três reatores com 1% de resíduo. Todos os restantes ensaios seguiram o mesmo procedimento, não sendo, no entanto, possível manter sempre os ensaios em triplicado, variando as concentrações de resíduo entre 1% e 7% da alimentação total (resíduo e lama mista, excluindo inóculo), conforme exposto no capítulo anterior.

Os ensaios eram constituídos por reatores com e sem resíduo (branco) permitindo assim avaliar o benefício ou prejuízo da adição do resíduo.

É, no entanto, de salientar que os ensaios não foram realizados todos no mesmo período de tempo, ou seja, nas mesmas datas, o que se traduz em diferenças nas características das lamas e do resíduo usado em cada ensaio, dificultando assim a análise comparativa dos resultados obtidos.

Em seguida, são apresentados os parâmetros obtidos para cada reator presente nos diferentes ensaios, sendo possível comparar os valores teoricamente esperados para o biogás (estimados com base no consumo de SV) com os valores de biogás medidos experimentalmente, e comparar a produção nos diferentes reatores. O exemplo de cálculo da quantidade esperada de biogás a produzir em cada reator encontra-se no Anexo B.

4.1 Resíduo

Como foi referido na descrição do caso de estudo quer o resíduo (contendo *FOG*) quer as lamas mistas utilizadas nos vários ensaios foram sempre diferentes.

A Tabela 4.1 resume os resultados das análises laboratoriais efetuadas ao resíduo utilizado nos diferentes ensaios.

Tabela 4.1 Comparação das características dos resíduos (contendo FOG) utilizados

Ensaio	pH	ST (g/L)	SV (g/L)	MS (%)	MV (%)
Resíduo 1 (Ensaio 1%)	4,08	42,9	25,3	4,1	2,4
Resíduo 2 (Ensaio 3% - 1º teste e 5%- 1º teste)	4,83	108,5	101,7	9,9	9,3
Resíduo 3 (Ensaio 3%- 2º teste e 5%- 2º teste)	4,60	53,9	41,9	5,0	3,9
Resíduo 4 (Ensaio 5%-3º teste e 7%)	4,49	117,4	108,4	11,2	10,3
Resíduo 5 (Ensaio 2% e 4%)	4,53	132,7	120,0	11,9	10,8

A partir da observação da referida Tabela 4.1 verifica-se que o resíduo que a ETAR recebe apresenta características variáveis, o que tornou mais difícil a realização dos ensaios, e a comparação de ensaios entre si.

4.2 Ensaio com 1% de resíduo

Na Tabela 4.2, são apresentados os parâmetros laboratoriais obtidos para os reatores iniciais (reatores denominados “branco inicial” e “1% inicial”) e logo após a mistura para os reatores com a adição de 1% (a, b e c) de resíduo e ainda para os reatores em branco (a, b e c) sem resíduo.

Tabela 4.2 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 1% de resíduo

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	26,5	6,92	22776	18089	2,79	2,22	288	1420	-
Branco_a	33,3	6,75	19058	14460	2,24	1,70	876	1940	0,45
Branco_b	33,1	6,70	19070	14468	2,20	1,67	840	1960	0,43
Branco_c	36,0	7,21	16256	11196	1,68	1,15	288	2820	0,10
1% inicial	25,0	6,87	22665	17903	2,30	1,81	312	1400	-
1%_a	36,2	7,18	16140	11108	1,54	1,06	288	2920	0,10
1%_b	36,2	7,20	16550	11320	1,67	1,14	384	2880	0,13
1%_c	36,2	7,22	16188	11064	1,65	1,13	264	2800	0,09

Na Figura 4.1 pode-se observar a quantidade de biogás produzido pelos reatores 1% e Branco_c (único Branco com quantidade de biogás mensurável) ao longo do ensaio. Na Tabela 4.3 pode-se observar a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator.

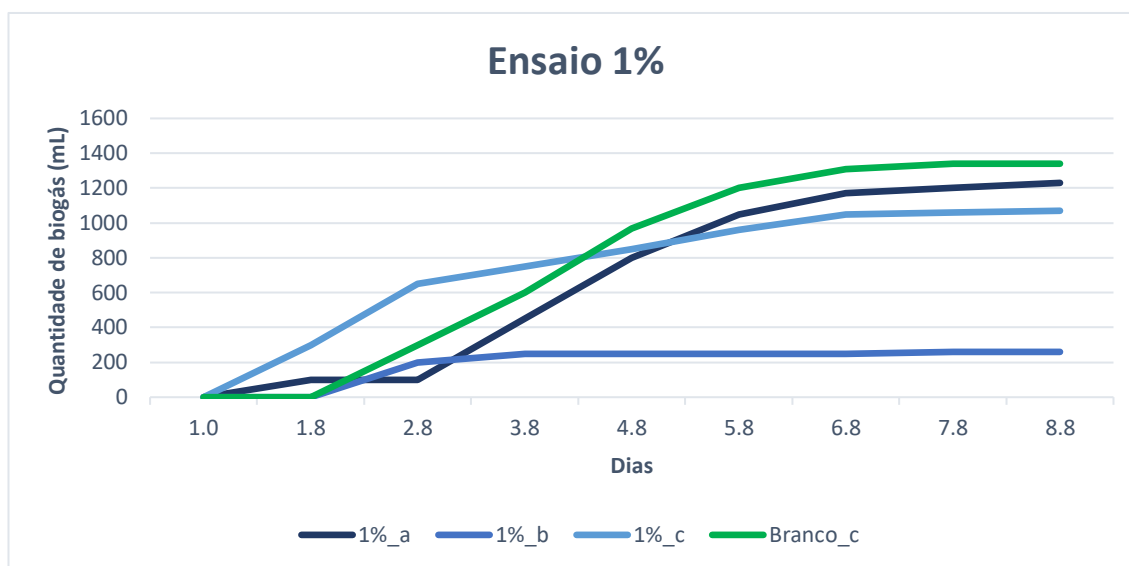


Figura 4.1 Evolução da quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio com 1%

Tabela 4.3 Valores de biogás produzido e esperado no ensaio com 1% de resíduo

	Branco_a	Branco_b	Branco_c	1%_a	1%_b	1%_c
Biogás produzido (L)	0,0	0,0	1,3	1,2	0,3	1,1
Biogás esperado (L)	1,1	1,1	2,1	2,0	2,0	2,1

Da análise das Tabela 4.2, Tabela 4.3 e da Figura 4.1, e comparando os reatores com a concentração de 1% de resíduo com os reatores Branco, verifica-se que a produção foi sempre inferior à prevista teoricamente e que os resultados obtidos nos 3 reatores com resíduo (1%_a, 1%_b e 1%_c) são concordantes no que diz respeito à degradação da matéria volátil traduzida pela quantidade de biogás esperado. Na quantidade de biogás realmente produzido, existem 2 ensaios concordantes (1%_a e 1%_c). Esta produção está também em linha com um dos ensaios em branco (Branco_c). A relação AGV/Alcalinidade dos reatores Branco_a e Branco_b sugere uma possível inibição das últimas fases da digestão mas também, possivelmente, das fases iniciais dado o menor consumo de matéria volátil quando comparados com o reator Branco_c. O mesmo não acontece com o reator 1%_b pois apresenta um valor de AGV/Alcalinidade de acordo com os restantes reatores com 1% de resíduo. A diferença face aos outros 2 reatores pode estar relacionada com a existência de fugas no circuito de medição de biogás. Se compararmos os valores de biogás esperado (SV destruídos) (Figura 4.2) entre os reatores branco e reatores com resíduo (1%), verifica-se que, em média os reatores com resíduo obtiveram uma maior degradação de matéria volátil muito embora se forem

apenas comparados os reatores sem suspeita de inibição, os valores são muito semelhantes.

Comparando os valores de biogás produzido dos reatores sem suspeita de inibição ou sem suspeita de fuga no circuito de medição, ou seja, os valores dos reatores Branco_c, 1%_a e 1%_c, verifica-se que há uma proximidade nos valores obtidos, sugerindo que não é significativo o efeito da adição de 1% de resíduo na alimentação ao digestor. No entanto, como se verifica na Tabela 4.1, o resíduo usado neste ensaio apresentava um teor de matéria volátil muito inferior à dos restantes ensaios, considera-se o ensaio é inconclusivo quanto ao efeito na produção de biogás da adição de 1% resíduo na alimentação ao digestor.

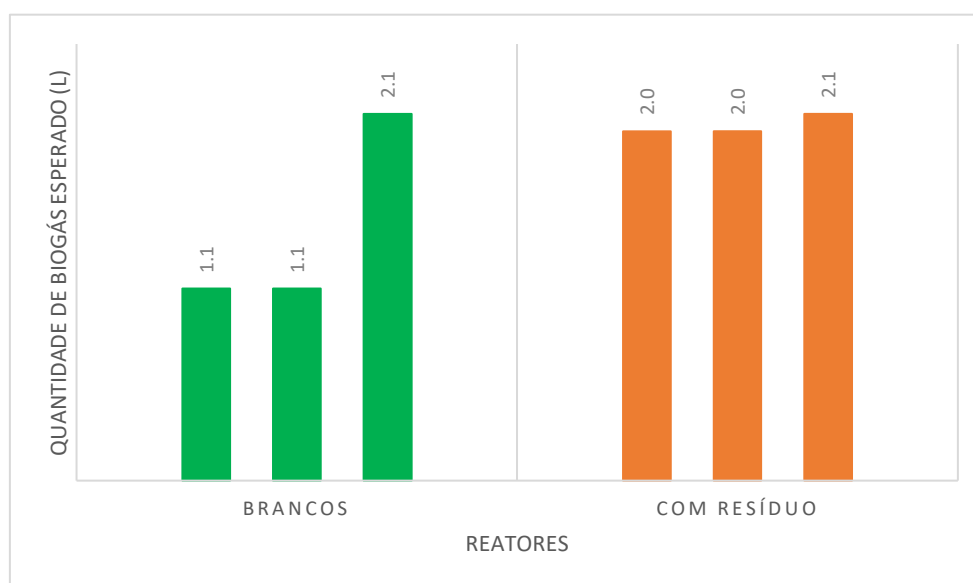


Figura 4.2 Comparação entre o biogás esperado dos reatores brancos e com resíduo (1%)

4.3 Ensaio com 2% de resíduo

Na Tabela 4.4, são apresentados os parâmetros laboratoriais obtidos para os reatores com a adição de 2% de resíduo e para o reator branco, logo após a mistura.

Tabela 4.4 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 2% de resíduo

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV/Alcalinidade
Branco inicial	31,0	7,19	23270	18232	2,43	1,91	180	1360	-
Branco_a (final)	38,6	7,19	15126	10334	1,63	1,11	168	2640	0,06
2% inicial	31,0	7,21	24490	19314	2,52	1,99	264	1340	-
2%_a	38,8	7,23	15330	10712	1,65	1,13	192	2500	0,08
2%_b	38,9	7,16	14341	11236	1,76	1,25	432	2140	0,20

Na Figura 4.3 pode-se observar a quantidade de biogás produzido pelo reator Branco_a e pelos reatores com 2% de resíduo ao longo do ensaio. Já na Tabela 4.5 apresenta-se a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e quantidade total de biogás esperada em cada reator.

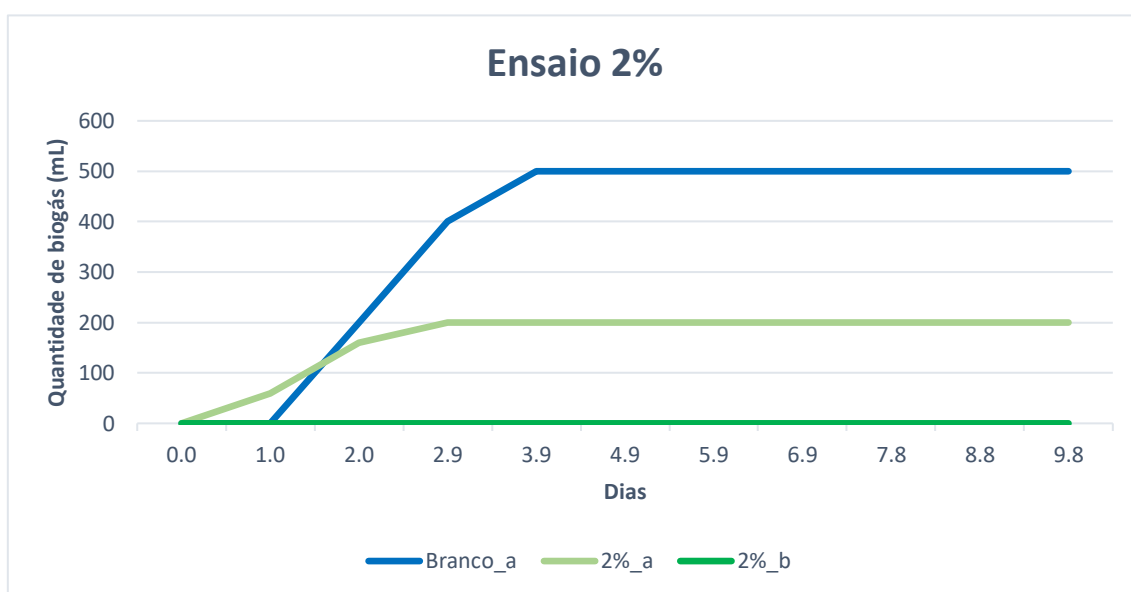


Figura 4.3 Evolução da quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio com 2% de resíduo

Tabela 4.5 Valores de biogás produzido e esperado do ensaio com 2% de resíduo

	Branco	2%_a	2%_b
Biogás produzido (L)	0,5	0,2	0,0
Biogás esperado (L)	2,4	2,6	2,4

Da análise da Tabela 4.4 e Tabela 4.5 e da Figura 4.3 observa-se que os reatores com 2% de resíduo estiveram muito aquém da produção esperada de biogás.

No que diz respeito à degradação de matéria volátil traduzida pela quantidade de biogás teoricamente esperada, o valor do reator Branco está relativamente concordante com os ensaios com resíduo, o que na prática não demonstra o benefício (nem do ponto de vista teórico) na introdução do resíduo, como se pode observar na Figura 4.4. Pode-se também dizer que não se verificou um processo de inibição pois os valores de AGV/Alcalinidade e de pH estão dentro dos valores normais. Assim, a diferença entre a produção efetiva de biogás e os valores esperados pode dever-se a fugas no circuito de medição de biogás. É de salientar que o resíduo 5 é o que apresenta maior teor de matéria volátil, logo os resultados deste teste em que se incorporou 2% de resíduo na alimentação ao digestor sugerem que não existe uma inibição na produção de biogás.

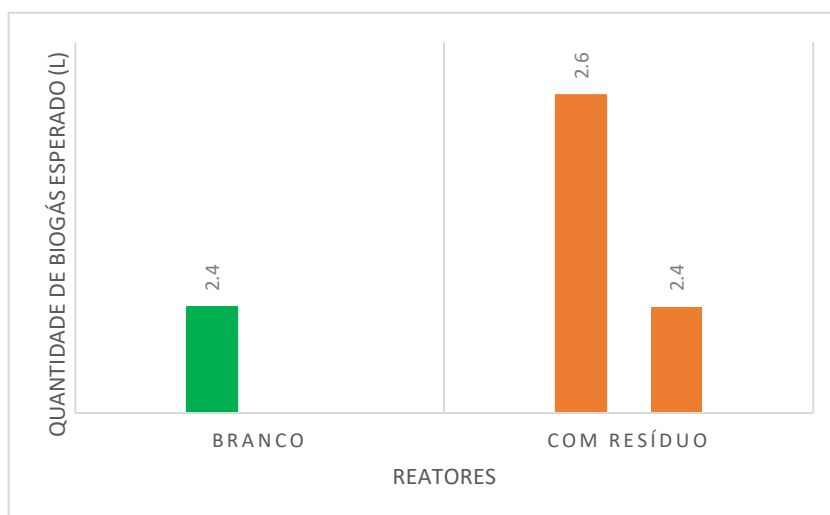


Figura 4.4 Comparação do biogás esperado do reator branco e com resíduo (2%)

4.4 Ensaio com 3% de resíduo

Referente à concentração de 3% de resíduo foram executados dois ensaios distintos, ou seja, em momentos diferentes, logo com lama e resíduo com características diferentes, como vamos poder ver a seguir nas secções 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 3% de resíduo – 1º teste

Na Tabela 4.6, são apresentados os resultados dos parâmetros laboratoriais obtidos para os reatores com a presença de 3% de resíduo e para os reatores em branco, logo após a mistura.

Tabela 4.6 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 3% de resíduo – 1º teste

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	25,3	7,29	24968	19334	2,56	1,98	-	-	-
Branco_a	36,0	7,15	17618	11674	1,78	1,18	276	3080	0,09
Branco_b	36,0	7,15	18074	12006	1,83	1,22	204	2980	0,07
3% inicial	25,3	6,97	25716	19892	2,70	2,09	360	1340	-
3%_a	36,0	7,34	18570	12632	1,89	1,28	348	2880	0,12
3%_b	36,0	6,85	21476	15456	2,17	1,56	1428	2640	0,54

Na Tabela 4.7 pode-se observar a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator. Pode-se também observar na Figura 4.5, a evolução da quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio pelos reatores branco e com 3% de resíduo.

Tabela 4.7 Valores de biogás produzido e esperado do ensaio com 3% de resíduo – 1º teste

	Branco_a	Branco_b	3%_a	3%_b
biogás produzido (L)	2,4	0,2	1,2	0,0
biogás esperado (L)	2,3	2,2	2,2	1,3

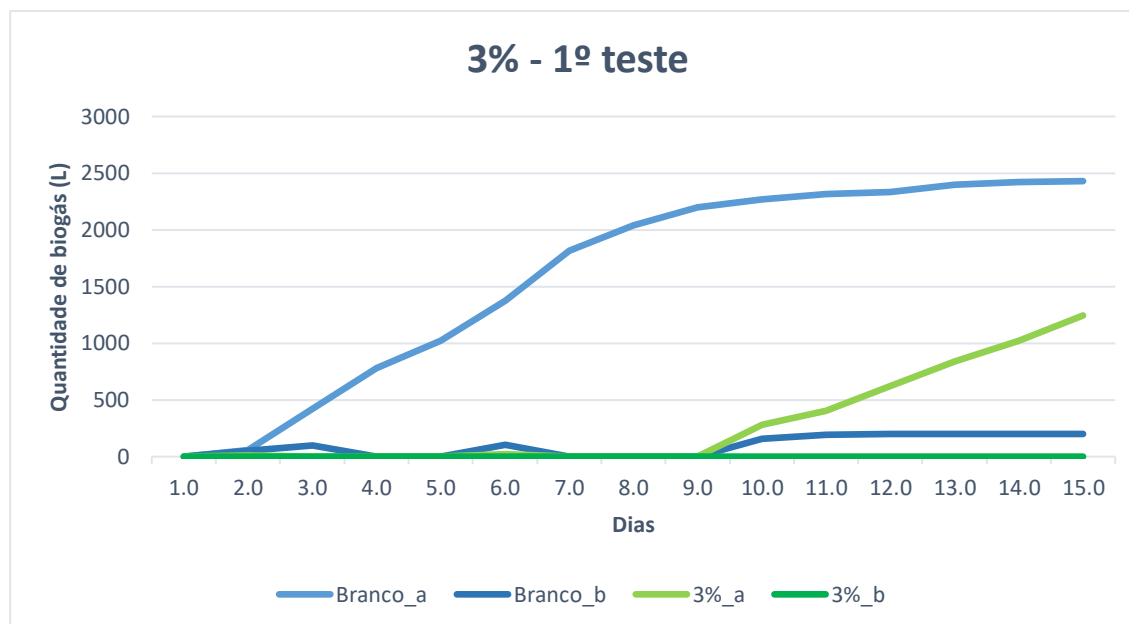


Figura 4.5 Evolução da quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio com 3% de resíduo – 1º teste

Da análise da Tabela 4.6 e Tabela 4.7 e da Figura 4.5, observamos que os reatores com adição de 3% de resíduo estiveram aquém da produção esperada de biogás, sendo que no caso do reator 3%_a a produção de biogás só se verificou após 9 dias do início do ensaio, o que mostra o comportamento atípico deste ensaio. Já no caso dos reatores em branco verificamos que o Branco_a inicia a produção após 48 h do início do ensaio e o

Branco_b tem picos de pequenas produções, estabilizando ao fim de 9 dias do início do ensaio num valor muito baixo de produção.

O atraso na produção no reator 3%_a pode dever-se a problemas na agitação dentro do reator, a entupimentos no circuito ou a um eventual problema na mistura inicial.

Relativamente aos resultados dos parâmetros laboratoriais, mais concretamente na diminuição de matéria volátil, ambos os reatores Branco têm valores concordantes com um dos reatores com resíduo (3%_a). Apenas o valor registado pelo reator 3%_b não é concordante com os restantes três. A explicação poderá estar no valor de AGV/Alcalinidade (0,54) final do reator 3%_b que sugere a possibilidade de ter existido inibição.

Comparando os valores de biogás teoricamente esperado com os valores realmente produzidos, verifica-se que apenas o reator Branco_a produziu biogás acima do valor teórico. Não é possível concluir sobre a produção do reator 3%_a uma vez que o ensaio foi terminado antes de ser atingido um período de estabilização na produção diária de biogás. O reator Branco_b apesar de ter revelado o mesmo potencial de produção de biogás que o outro reator em branco (degradação de SV), na realidade não o produziu ou não foi medido. A razão para tal pode estar em fugas no circuito de medição de biogás.

Se se excluir o valor de biogás esperado do reator 3%_b por suspeita de inibição e se comparar os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre os reatores brancos e o reator 3%_a (Figura 4.6), verifica-se que os valores são concordantes pelo que mesmo do ponto de vista teórico (potencial de produção de biogás) não sendo possível demonstrar o benefício da introdução do resíduo, bem pelo contrário.

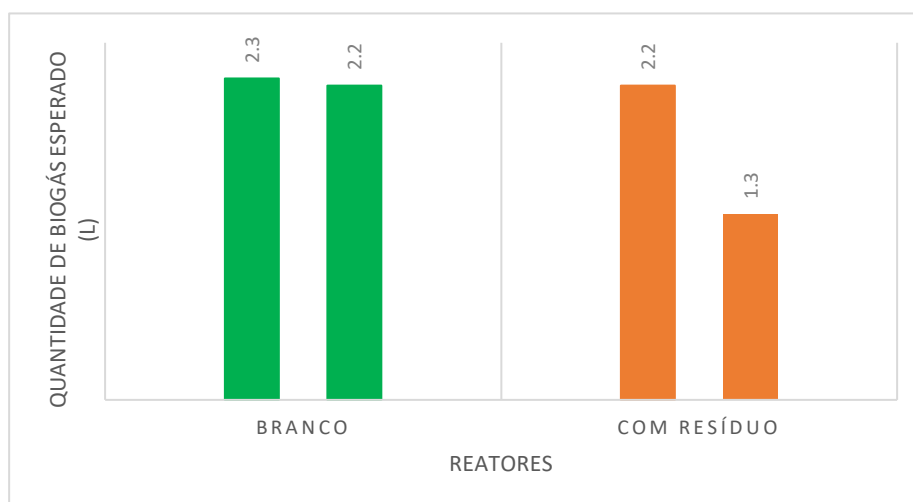


Figura 4.6 Comparação entre o biogás esperado dos reatores brancos e com 3% de resíduo – 1º teste

4.4.2 3% de resíduo – 2º teste

Na Tabela 4.8, são apresentados os valores experimentais obtidos para os reatores com a presença de 3% de resíduo e para os reatores branco, logo após a mistura. Neste ensaio a constituição dos reatores são diferentes do ensaio anterior, pois foram iniciados noutro dia.

Tabela 4.8 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 3% de resíduo -2º teste

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	30,1	6,96	29960	23866	3,09	2,46	360	1400	-
Branco_c	36,4	6,37	23374	17066	2,38	1,74	2016	2800	0,7
Branco_d	36,4	6,77	18500	13504	1,88	1,37	1140	2420	0,5
3% inicial	30,1	6,89	29152	23076	2,99	2,37	384	1420	-
3%_c	38,0	6,36	23024	16816	2,34	1,71	2052	2800	0,7
3%_d	38,0	6,88	19946	14330	2,03	1,46	1944	2620	0,7

Na Tabela 4.9 pode-se observar a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator. Pode-se também observar na Figura 4.7, a evolução da quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio.

Tabela 4.9 Valores de biogás produzido e esperado do ensaio com 3% de resíduo -2º teste

	Branco_c	Branco_d	3%_c	3%_d
Biogás produzido (L)	0,01	0,8	0,05	0,7
Biogás esperado (L)	2,04	3,1	1,9	2,6

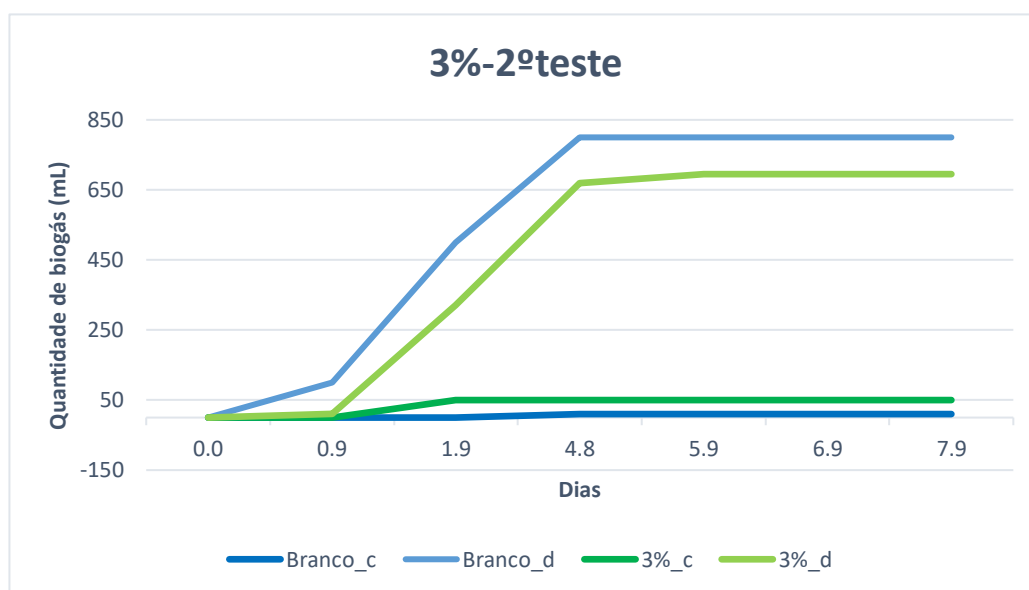


Figura 4.7 Quantidade de biogás produzido ao longo da duração do ensaio com 3% de resíduo -2º teste

Da análise da Tabela 4.8 e da Tabela 4.9 e da Figura 4.7, observamos que os reatores com adição de 3% de resíduo estiveram aquém da produção esperada de biogás, assim como os reatores Brancos.

Relativamente aos resultados dos parâmetros laboratoriais dos reatores Branco e dos reatores com 3% de resíduo, não há concordância entre os vários resultados obtidos, o que torna difícil obter conclusões. No entanto é possível observar todos os reatores apresentam valores bastante elevados de AGV/Alcalinidade (entre 0,5 e 0,7) o que sugere a existência de inibição, mais ou menos extensa, em todos eles. O reator onde se obteve valores mais elevados de biogás produzido e de biogás esperado, foi o reator Branco_d que reforça assim a ideia anterior na medida em que o valor de AGV/Alcalinidade é o menor dos 4 reatores.

Comparando os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre os reatores brancos e com 3% de resíduo (Figura 4.8), verifica-se que os reatores com 3% têm um valor de biogás esperado inferior aos reatores branco, isso significa que a adição de resíduo ao reator representa uma pequena diminuição na produção de biogás. Embora os resíduos 2 e 3 apresentem características bastante diferentes (tabela 4.1), tendo o resíduo 3 um teor muito menor de matéria volátil, os resultados deste ensaio confirmam as suspeitas de inibição verificadas no ensaio anterior com a mesma % de resíduo.

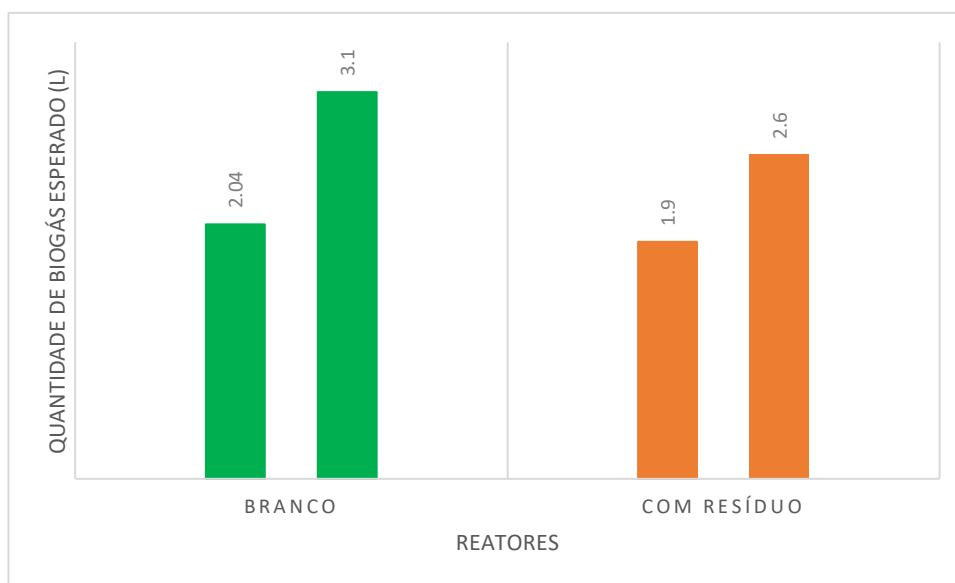


Figura 4.8 Comparação entre o biogás esperados dos reatores brancos e com 3% de resíduo -2º teste

4.5 Ensaio com 4% de resíduo

Na Tabela 4.10, são apresentados os valores experimentais obtidos para os reatores com a presença de 4% de resíduo e para o reator em branco.

Tabela 4.10 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 4% de resíduo

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV/Alcalinidade
Branco inicial	31,0	7,19	23270	18232	2,43	1,91	180	1360	-
Branco final	38,6	7,19	15126	10334	1,63	1,11	168	2640	0,06
4% inicial	30,8	7,15	24982	19824	2,62	2,08	348	1380	-
4%_a	39,0	7,21	13154	10724	1,66	1,15	180	2560	0,07
4%_b	39,0	7,23	12294	10722	1,69	1,17	192	2580	0,07

Pode-se também observar na Tabela 4.11 a comparação entre o biogás produzido e o biogás esperado.

Tabela 4.11 Comparação entre o biogás produzido e esperado do ensaio com 4% de resíduo

	Branco	4%_a	4%_b
Biogás produzido (L)	0,5	0,0	0,0
Biogás esperado (L)	2,4	2,7	2,7

Da análise a Tabela 4.10 e Tabela 4.11, observamos que quer nos reatores com concentração de 4% de resíduo quer no reator branco houve degradação de matéria volátil, sendo esta superior nos dois reatores com resíduo. No entanto este valor apresenta apenas a previsão de produção de biogás (biogás esperado). Os valores reais apresentam-se nulos no caso dos reatores com resíduo e muito baixos no reator Branco (0,5 L) quando comparado com a previsão de produção de biogás. Os valores de AGV/Alcalinidade estão dentro dos valores habituais pelo que a explicação para estes valores baixos de produção real de biogás pode estar na existência de fugas no circuito reator/tubagem/garrafa. Ou seja, supõe-se que o biogás foi efetivamente produzido, mas não medido. Comparando os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre o reator branco e reatores com 4% de resíduo (Figura 4.9) verifica-se que os reatores com 4% têm um valor de biogás esperado superior ao reator Branco, isso sugere que a adição de 4% de resíduo ao reator não causa inibição e pode até representar um potencial aumento na produção de biogás.

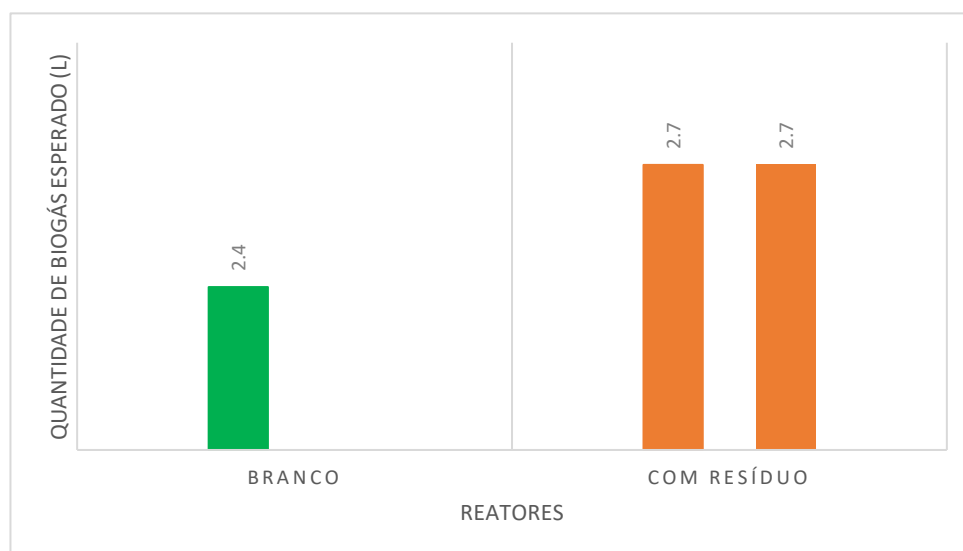


Figura 4.9 Comparação entre o biogás esperado nos reatores branco e com 4% resíduo

4.6 Ensaio com 5% de resíduo

Referente à concentração de 5% de resíduo foram executados 3 ensaios distintos, ou seja, em momentos diferentes, logo com lama e resíduo diferentes, como vamos poder ver a seguir nas secções 4.6.1, 4.6.2 e 4.6.3.

4.6.1 5% de resíduo – 1º teste

Na Tabela 4.12 são apresentados os valores laboratoriais obtidos para os reatores com a presença de 5% de resíduo e para os reatores branco relativos ao 1º teste.

Tabela 4.12 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 5% de resíduo – 1º teste

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	25,3	7,29	24968	19334	2,56	1,98	-	-	-
Branco_a	36,0	7,15	17618	11674	1,78	1,18	276	3080	0,09
Branco_b	40,5	7,15	18074	12006	1,83	1,22	204	2980	0,07
5% inicial	25,3	6,93	25964	20200	2,72	2,11	396	1340	-
5%_a	39,9	6,45	21812	15830	2,21	1,61	2540	1812	1,4
5%_b	39,1	6,79	21398	15468	2,17	1,57	1392	2700	0,5

Na Tabela 4.13 observamos a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator. Pode-se também observar na Figura 3.1, a quantidade de biogás produzido ao longo da duração do ensaio pelos reatores Branco e com 5% de resíduo.

Tabela 4.13 Comparação entre o biogás produzido e esperado do ensaio com 5% de resíduo – 1º teste

	Branco_a	Branco_b	5%_a	5%_b
Biogás produzido (L)	2,4	0,2	0,0	0,1
Biogás esperado (L)	2,3	2,2	1,3	1,4

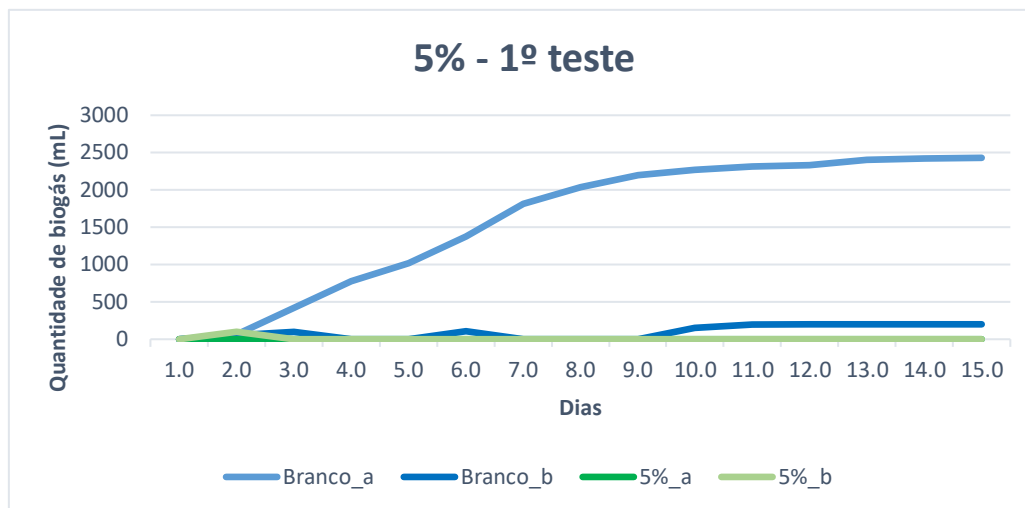


Figura 4.10 Quantidade de biogás produzido ao longo da duração do ensaio com 5% de resíduo – 1º teste

Da análise da Tabela 4.12 e da Tabela 4.13 e da Figura 4.10 verifica-se que os reatores com 5% de resíduo apresentam valores elevados de AGVs/Alcalinidade finais, o que indica um processo de inibição (possivelmente na fase de metanogénese). Sendo que no caso dos reatores Branco este aumento de valores finais de AGVs não se verifica. Verificamos também que o reator 5%_a apresenta um valor de pH ligeiramente inferior a 6,5 o que indica assim a presença de acidificação no reator. É também possível verificar que o reator Branco_a tem uma produção de biogás muito próxima da prevista. A diferença entre o valor de biogás produzido nos reatores Branco_a e Branco_b e os valores esperados (quantidade de biogás esperado semelhante) poderá estar relacionada com fugas no circuito. A análise da Figura 4.11 sugere que terá ocorrido inibição dos microrganismos uma vez que a adição de 5% de resíduo provocou uma menor degradação de matéria volátil e portanto um menor potencial de produção de biogás.

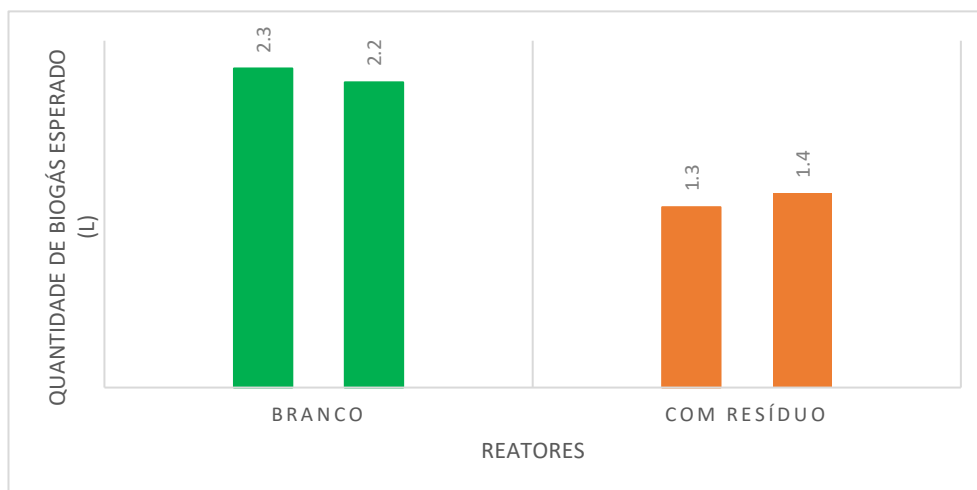


Figura 4.11 Comparação entre o biogás esperado dos reatores brancos e com 5% de resíduo

4.6.2 5% de resíduo – 2º teste

Na Tabela 4.14, são apresentados os valores laboratoriais obtidos para os reatores com a presença de 5% de resíduo e para os reatores branco.

Tabela 4.14 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 5% de resíduo – 2º teste

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	30,1	6,96	29960	23866	3,09	2,46	360	1400	-
Branco_c	36,4	6,37	23374	17066	2,38	1,74	2016	2800	0,7
Branco_d	36,4	6,77	18500	13504	1,88	1,37	1140	2420	0,5
5% inicial	28,0	7,22	21492	16466	2,21	1,69	300	1400	-
5%_c	38,3	6,25	17732	12972	1,81	1,33	684	2020	0,3
5%_d	38,3	6,81	15772	10916	1,62	1,12	900	2240	0,4

Na Tabela 4.15 observa-se a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator. Pode-se também observar na Figura 4.12 a quantidade de biogás produzido ao longo do ensaio pelos reatores Branco e com 5% de resíduo.

Tabela 4.15 Valores de biogás produzido e esperado do ensaio com 5% de resíduo – 2º teste

	Branco_c	Branco_d	5%_c	5%_d
Biogás produzido (L)	0,01	0,8	0,03	0,8
Biogás esperado (L)	2,04	3,1	1,0	1,6

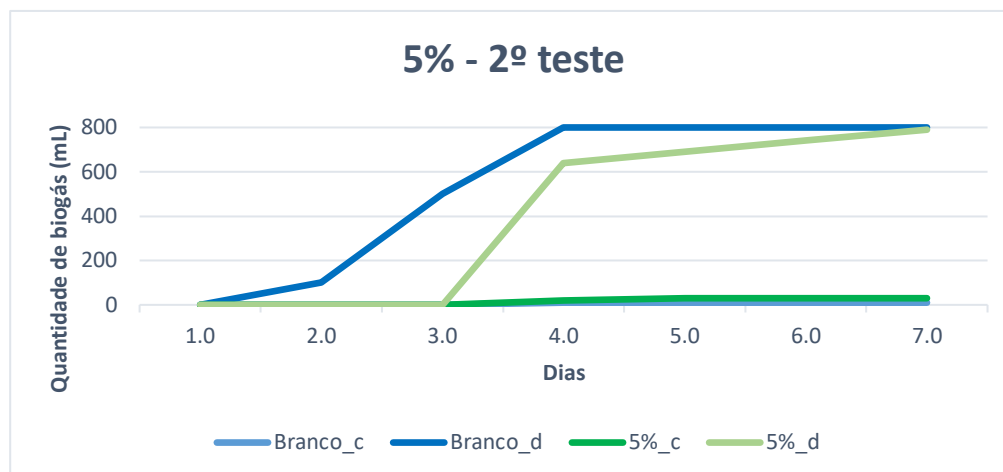


Figura 4.12 Quantidade de biogás produzido ao longo da duração do ensaio com 5% de resíduo – 2º teste

Da análise da Tabela 4.14 e da Tabela 4.15 e da Figura 4.12, observamos que quer os reatores com adição de 5% de resíduo quer os reatores Branco tiveram uma produção de biogás baixa, quando comparados com a quantidade esperada de produção.

Relativamente aos resultados dos parâmetros laboratoriais, os valores dos reatores Branco apresentam valores superiores de degradação de matéria volátil (biogás esperado) quando comparados com os valores obtidos pelos reatores com resíduo. Os valores de AGVs/Alcalinidade elevados indiciam a ocorrência de um processo de inibição, mais ou menos extenso nos reatores com resíduo mas sobretudo nos reatores Branco, além disso o reator 5%_c apresenta um valor de pH inferior a 6,5 o que indica assim a presença de acidificação no reator. Também observamos que o reator 5%_d só inicia a produção de biogás ao fim de 3 dias do início do ensaio, devido a um período de 48h (2 dias) onde o banho ficou sem adição de água, e assim sendo a temperatura do reator desceu e a leitura de biogás nesse mesmo período não foi realizada.

Comparando os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre os reatores brancos e reatores com 5% (Figura 4.13), verifica-se que os reatores com 5% de resíduo têm um valor de biogás esperado inferior ao reator branco, isso significa que a adição de resíduo ao reator representa uma diminuição nítida da degradação de matéria volátil, logo do potencial de produção de biogás. Apesar do problema de controlo da temperatura, estas conclusões estão concordantes com as obtidas no 1º teste, em que se usou a mesma concentração de resíduo

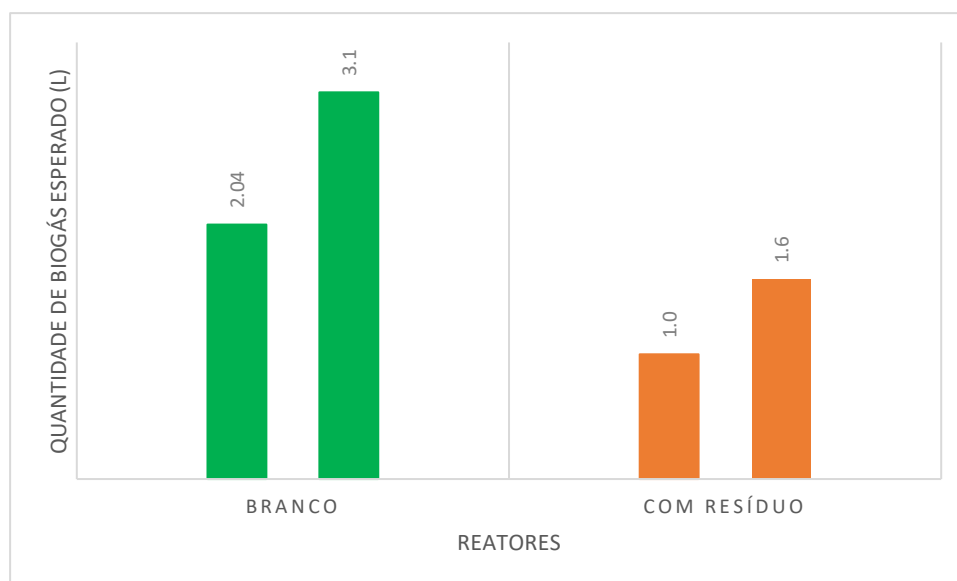


Figura 4.13 Comparação do biogás esperado entre os reatores brancos e com 5% de resíduo – 2º teste

4.6.3 5% de resíduo – 3º teste

Na Tabela 4.16, são apresentados os valores laboratoriais obtidos para os reatores com a presença de 5% de resíduo e para os reatores branco.

Tabela 4.16 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 5% de resíduo - 3º teste

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	15,3	6,84	31286	24684	3,31	2,61	240	1300	-
Branco_e	32,1	6,65	21284	15250	2,23	1,6	2004	2620	0,8
5% inicial	14,8	6,63	32672	26038	3,44	2,74	336	1300	-
5%_e	38,4	5,73	24222	17744	2,47	1,81	2946	2580	1,1
5%_f	38,4	6,72	63622	57250	6,75	6,08	3020	1884	1,6

Na Tabela 4.17 observamos a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada em cada reator.

Tabela 4.17 Comparação entre o biogás produzido e esperado no ensaio com 5% de resíduo - 3º teste

	Branco_e	5%_e	5%_f
Biogás produzido (L)	0,0	0,2	0,35
Biogás esperado (L)	2,8	2,5	-

Da análise da Tabela 4.16 e da Tabela 4.17, observamos que os reatores com adição de 5% de resíduo tiveram uma produção de biogás baixa, sendo que no caso do reator Branco não chegou haver produção ou medição do biogás produzido. Relativamente aos

resultados dos parâmetros laboratoriais, os valores do reator Branco apresentam valores superiores de degradação de matéria volátil (biogás esperado) quando comparados com os valores obtidos nos reatores com resíduo. Os valores de AGVs/Alcalinidade elevados indiciam a presença de um processo de inibição, mais ou menos extenso no reator Branco mas sobretudo nos reatores com resíduo, além disso o reator 5%_e apresenta um valor de pH inferior a 6,5 o que indica assim a presença de acidificação no reator. A existência de fugas presentes no circuito reator/garrafa poderá ser também uma justificação para a não quantificação do biogás produzido.

Comparando os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre os reatores brancos e reatores com 5% de resíduo, verifica-se que os reatores com 5% têm um valor de biogás esperado inferior ao reator branco (Figura 4.14), isso significa que a adição de resíduo ao reator representa uma diminuição nítida na degradação de matéria volátil, logo no potencial de produção de biogás. Seguindo a mesma tendência que nos testes anteriores realizados com esta mesma concentração de resíduo, onde as características dos resíduos usados no 1º e 3º testes são muito semelhantes (tabela 4.1), com teores de matéria volátil muito mais elevada no resíduo usado no 2º teste, onde também ocorreram problemas operatórios ao nível do controlo da temperatura.

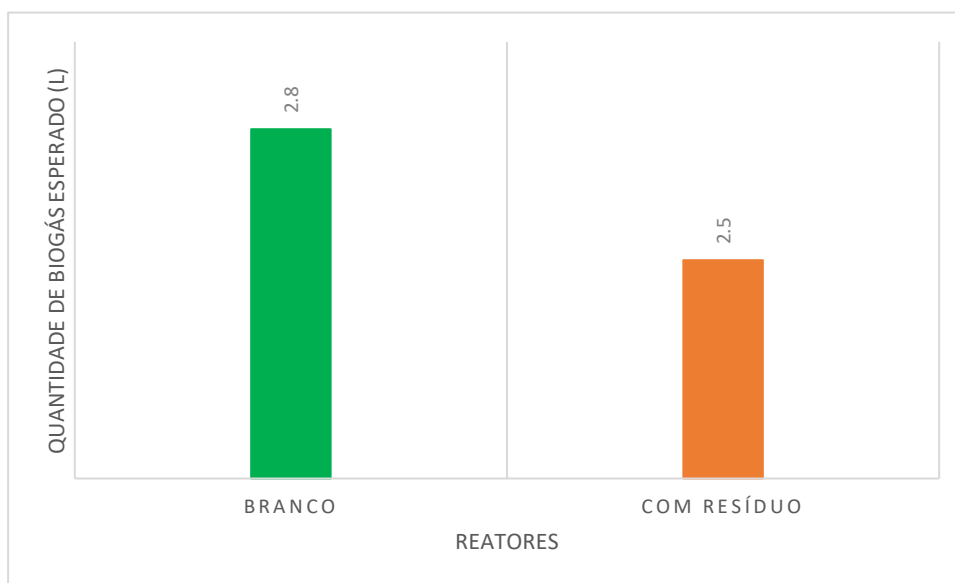


Figura 4.14 Comparação do biogás esperado entre o reator branco e com 5% resíduo - 3º teste

4.7 Ensaio com 7% de resíduo

Na Tabela 4.18 são apresentados os valores laboratoriais obtidos para os reatores com a presença de 7% de resíduo e para o reator branco, logo após a mistura.

Tabela 4.18 Parâmetros laboratoriais do ensaio com 7% de resíduo

Reator	Temperatura (°C)	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MS (%)	MV (%)	AGV (mg/L)	Alcalinidade (mg/L)	AGV / Alcalinidade
Branco inicial	15,3	6,84	31286	24684	3,31	2,61	240	1300	-
Branco final	32,1	6,65	21284	15250	2,23	1,6	2004	2620	0,8
7% inicial	14,8	6,58	32876	26350	3,46	2,77	396	1240	-
7%_a	38,5	6,72	25744	18922	2,62	1,92	3000	1908	1,6
7%_b	38,5	5,56	27620	20590	2,78	2,07	3288	2840	1,2

Na Tabela 4.19 pode-se observar a comparação entre a quantidade total de biogás produzido e a quantidade total de biogás esperada para cada reator.

Tabela 4.19 Valores de biogás produzido e esperado do ensaio com 7% de resíduo

	Branco	7%_a	7%_b
Biogás produzido (L)	0,0	0,05	0,1
Biogás esperado (L)	2,8	2,2	1,7

Da análise da Tabela 4.18 e da Tabela 4.19, observamos que os reatores com adição de 7% de resíduo tiveram uma produção de biogás baixa, sendo que no caso do reator Branco não ocorreu produção ou não foi medido.

Relativamente aos resultados dos parâmetros laboratoriais, o reator Branco apresenta valores superiores de degradação de matéria volátil (biogás esperado) quando comparados com os valores obtidos pelos reatores com resíduo. Os valores de AGV/Alcalinidade elevados indiciam a presença de um processo de inibição, mais ou menos extenso, no reator Branco e sobretudo nos reatores com resíduo. A existência de fugas presentes no circuito reator/garrafa poderá justificar a não quantificação do biogás produzido.

Comparando os valores de biogás esperado (SV destruídos), entre os reatores brancos e reatores com 7% de resíduo (Figura 4.15), verifica-se que estes últimos têm um valor de biogás esperado inferior ao reator branco, o que sugere que a adição de 7% de resíduo ao reator causa uma diminuição na degradação de matéria volátil, logo do potencial de produção de biogás.

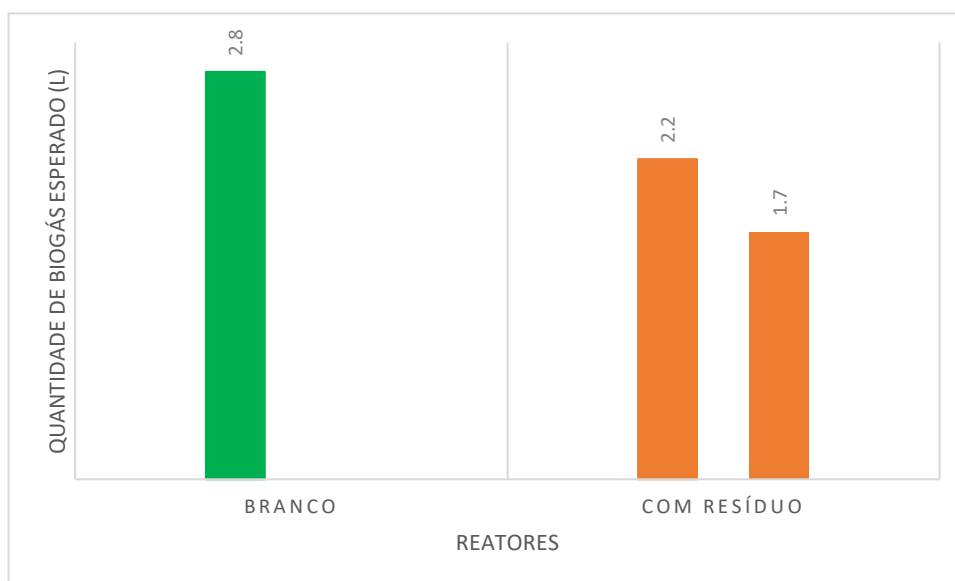


Figura 4.15 Comparação entre o biogás esperado do reator branco e com resíduo 7%

4.8 Comparação dos resultados para as diferentes concentrações de resíduo

Nesta secção resume-se os valores de biogás esperados (baseados nos SV destruídos) para o reator Branco e com resíduo, para as diferentes concentrações de resíduo que variaram entre 1% e 7%. No caso dos ensaios com adição de 3% e 5% de resíduo, foram realizados mais do que um ensaio, daí aparecer na tabela em duplicado um ensaio com 3% e em triplicado o ensaio com 5%. A realização destes ensaios quer em duplicado e triplicado, foi efetuada em dias diferentes. No anexo C encontra-se o cálculo da quantidade mássica para cada resíduo.

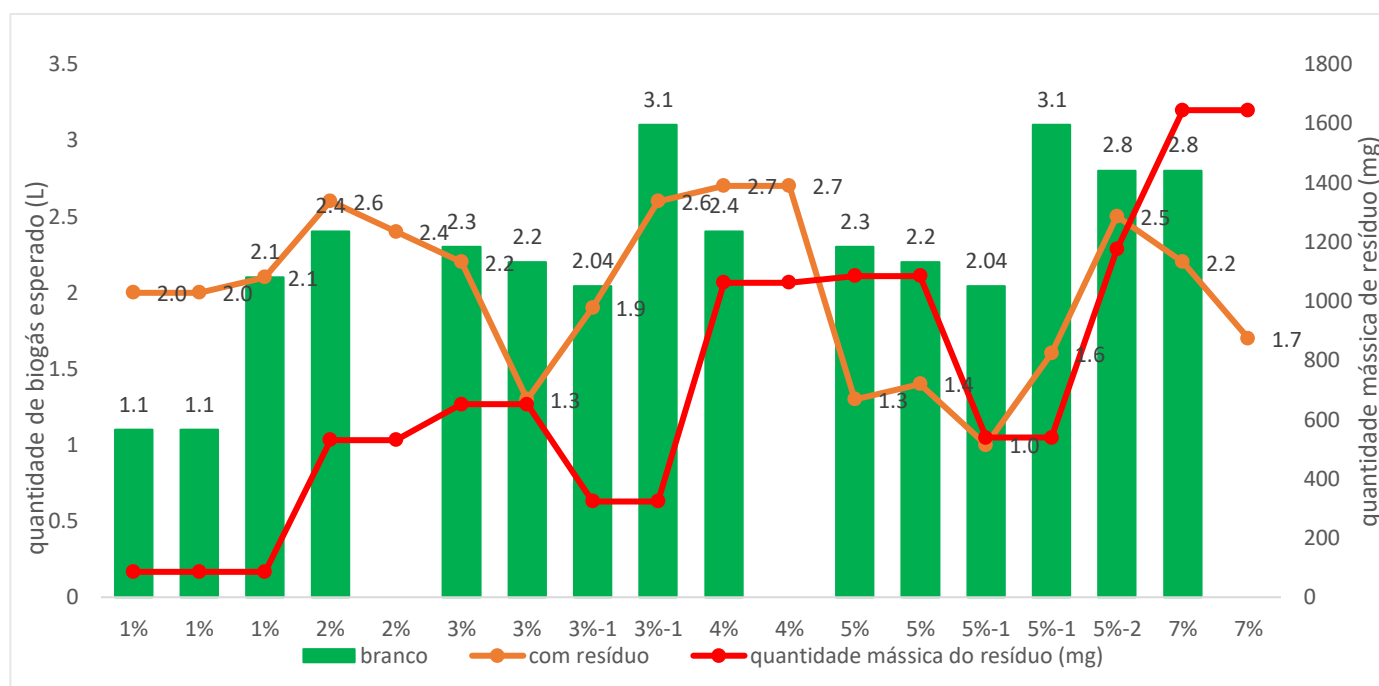


Figura 4.16 Comparação entre o biogás esperado dos reatores brancos e com resíduo, com a quantidade mássica do resíduo

Não é possível comparar ensaios realizados em dias diferentes, mesmo tratando-se de ensaios com percentagens de resíduo iguais, porque em cada ensaio as características da lama mista, da lama digerida e sobretudo do resíduo são diferentes.

No entanto, observando a Figura 4.16 verifica-se que os ensaios contendo 1%, 2% e 4% de resíduo apresentam valores de biogás esperado superiores aos dos respectivos reatores em branco. Os ensaios com 2% e 4 % de resíduo são ensaios com apenas 1 reator branco e 2 contendo resíduo, ao contrário do ensaio com 1 % de resíduo que foi efetuado em triplicado quer nos reatores brancos quer nos reatores com resíduo, dando maior segurança quanto às conclusões que daí se retiram. Assim relativamente aos ensaios com 2 e 4% as conclusões devem ser tidas com alguma reserva, até porque os ensaios realizados com 3% de resíduo já sugerem a ocorrência de inibição.

Verifica-se que os reatores com 5% e 7% de resíduo apresentam um valor de biogás esperado muito inferior ao reator branco de referência, indicando a ocorrência de inibição.

CONCLUSÕES

- 5.1 CONCLUSÕES
- 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este estudo teve como finalidade otimizar a incorporação de um resíduo (co-substrato contendo *FOG*) no processo de digestão anaeróbia de uma ETAR do grupo SIMDOURO e quantificar a produção de biogás.

Numa fase inicial foram efetuados cálculos para estimar qual a proporção de lamas, inóculo e resíduo a usar, mantendo constante a proporção de inóculo, variando apenas a proporção de resíduo, tendo em conta a gama de operação do digestor real.

Foram realizados diferentes ensaios, com adição de diferentes proporções de resíduo, de 1% até 7% nos reatores, sendo paralelamente realizados reatores em branco, tendo como função servir de comparação com os reatores onde era adicionado resíduo.

Foi feita a caracterização do conteúdo de cada reator, antes e depois de cada ensaio, de modo a estimar a produção esperada de biogás a partir da degradação de sólidos voláteis nesse reator, tendo sido determinados os seguintes parâmetros: (sólidos voláteis, sólidos totais, matéria seca, matéria volátil, pH, temperatura, alcalinidade e ácidos gordos voláteis).

Em ambos os “tipos” de reatores (“Branco” e reatores com resíduo), foi possível verificar a existência de inibição dado que existiram vários reatores (Branco e com resíduo) com valores acima de 0,4 do rácio AGV / Alcalinidade com consequentes baixas produções de biogás, mais concretamente em 53% (8 em 15) dos reatores Branco e 58% (11 em 19) dos reatores com resíduo. Ou seja, a introdução do resíduo, não parece ser, por si só, a razão para a existência de inibição com prejuízo na produção de biogás, embora o facto do inóculo usado nos diversos ensaios tenha sido a lama digerida do digestor, cujos microrganismos já estarão aclimatados a este resíduo já que o digestor recebe periodicamente este resíduo na sua alimentação. Além disso verificou-se que no ensaio com 5% de resíduo, que pelo menos um dos reatores com resíduo realizados em cada teste apresentou um valor de pH inferior a 6,5, o que indica assim a presença de um processo de acidificação nos reatores.

A análise à quantidade de biogás efetivamente produzida nos diversos ensaios foi dificultada pela existência de fugas e entupimentos no circuito de medição de biogás e por problemas na mistura dos reatores, pelo que uma análise comparativa dos reatores deve ser feita essencialmente através da quantidade de sólidos voláteis digeridos e a partir do cálculo da quantidade de biogás esperado.

Assim, quando comparamos os diversos ensaios quanto à matéria volátil digerida, ou seja os valores de biogás esperados, dos reatores Branco e com resíduo verificou-se que nos ensaios com 1%, 2% e 4% de resíduo, a adição de resíduo, significou um potencial aumento de produção de biogás (quantidade de biogás esperado fruto da maior degradação de matéria volátil) em comparação com o reator branco correspondente, mas na prática não foi possível confirmar dado os problemas existentes na medição de biogás efetivamente produzido e a existência de reatores com inibição. Nos restantes ensaios, a adição de resíduo significou uma diminuição da quantidade de biogás esperado (menor quantidade de matéria volátil digerida) em comparação com a quantidade de biogás esperado nos reatores branco correspondentes.

A discrepância entre a quantidade de biogás esperado e a quantidade efetivamente produzida nos diversos ensaios deveu-se, provavelmente, a inibições da fase metanogénica (acidificação do conteúdo dos reatores) e a fugas no circuito de medição de biogás. Sem descartar o fator utilizado para o cálculo do biogás esperado, que neste caso foi de $0,75 \text{ m}^3/\text{kg}$ de SV destruído, estando compreendido entre $0,75$ e $1 \text{ m}^3/\text{kg}$ de SV destruídos. Misturas iniciais não homogêneas ou problemas na agitação podem também estar na origem das discrepâncias entre réplicas do mesmo ensaio.

Considerando também o facto de a temperatura do banho não ser constante durante todo o tempo da realização do ensaio, pois ao fim do dia a temperatura ambiente arrefece, e também houve algumas situações em que uma parte significativa da água presente no banho se tinha evaporado, fazendo com que os reatores não atingissem a temperatura desejada, como foi o caso do ensaio de 5% - 2º teste (no reator 3%_d) que só iniciou a sua produção ao fim de 3 dias de ensaio.

Considera-se que os resultados obtidos neste trabalho não foram conclusivos, portanto devem ser encarados com reservas quanto ao efeito inibidor ou potenciador de formação de biogás na codigestão do resíduo estudado, pois tratava-se de uma instalação um pouco artesanal e, portanto, bastante sujeita a fugas e sem grandes possibilidades de controlo e monitorização de parâmetros importantes como o pH, e até mesmo uma contabilização do biogás produzido ao longo do ensaio.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Relativamente a trabalhos futuros e no seguimento deste, o que se propõe é a realização deste tipo de ensaios em equipamento adequado designados por BMTP (*Biochemical Methane Potential Tester*) de forma a que a medição de biogás, a agitação dos reatores e a manutenção uniforme da temperatura sejam variáveis perfeitamente controladas, cuja variação descontrolada não provoque alterações que dificultam a análise de resultados.

Propõe-se também uma melhor caracterização do co-substrato (resíduo) utilizado dado que os resultados obtidos estão dependentes do tipo e quantidade de resíduo adicionado

A metodologia de realização de futuros ensaios poderia basear-se na replicação do digestor real à escala laboratorial, mas onde fosse possível realizar uma alimentação contínua e recirculação de lamas, o que neste estudo não foi possível.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] M. Pires, “Análise da eficiência do processo de digestão anaeróbia de lamas da ETAR municipal do Choupal,” Tese de Mestrado em Engenharia Química - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2015.
- [2] “Protocolo de Quioto.” [Online]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28060_pt.htm.
- [3] E. Union, *Diretiva relativa à promoção de fontes de energia renováveis na UE*. 2019.
- [4] A. Deublein, Dieter; Steinhäuser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All, 2008.
- [5] A. J. P. R. da Silva, “A produção de biogás na ETAR de Gaia Litoral : Estudo preliminar por Análise dos Componentes Principais,” 2015.
- [6] B. D. L. Oliveira, “Controlo e avaliação do sistema de tratamento de águas residuais da ETAR de Gaia Litoral e ETAR de Febros,” p. 62, 2017.
- [7] Á. de Gaia, “ETAR Gaia Litoral_brochura.pdf.” .
- [8] SimDouro, “<http://www.simdouro.pt/dados.php?ref=etargaialit> (01/03/2020).” .
- [9] J. Debruyne and D. Hilborn, “Anaerobic Digestion Basics,” *Small*, vol. 2007, no. 07, pp. 1–6, 2007.
- [10] EurObserv’er, “Biogas Barometer 2017,” no. November, p. 14, 2017.
- [11] D. P. Van, T. Fujiwara, B. L. Tho, P. P. S. Toan, and G. H. Minh, “A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends,” *Environ. Eng. Res.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.4491/eer.2018.334.
- [12] A. Odnell, “Influencing anaerobic digestion early stage processes for increased biomethane production from different substrate components,” Licentiate Thesis Science and Technology - Linköping University, Sweden, 2018.
- [13] U.S. Environmental Protection Agency., “Biosolids Technology Fact Sheet: Multi-Stage Anaerobic Digestion,” *Us Epa/832/F-06/031*, p. 13, 2006.
- [14] C. Mao, F. Yongzhong, X. Wang, and G. Ren, “Review on Research Achievements of Biogas from Anaerobic Digestion,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, p. Renew. Sustain. Energy Rev., Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.032.
- [15] J. L. Ramos-Suárez, N. C. Arroyo, and C. González-Fernández, “The Role of Anaerobic Digestion in Algal Biorefineries: Clean Energy Production, Organic Waste Treatment, and Nutrient Loop Closure,” in *Algae and Environmental Sustainability*, B. Singh, K. Baudh, and F. Bux, Eds. New Delhi: Springer India, 2015, pp. 53–76.
- [16] S. K. Wahono, R. Maryana, and M. Kismurtono, “Biogas purification process to increase gen - Set efficiency,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1169, no. November, pp. 185–189, 2009, doi: 10.1063/1.3243250.

- [17] R. Sharma, V K, Fortuna, F, Caudatelli, M, Cornacchia, G, & Farina, *Anaerobic digester for treatment of organic waste*, ENTE PER L. Italy, 1997.
- [18] M. et al Kayhanian, "Two-stage process combines anaerobic and aerobic methods," *Biocycle*, vol. 32, no. 3, pp. 48–53, 1990.
- [19] C. B. Anderson, G. K and Saw, "Leach - bed two - phase anaerobic digestion of municipal solid waste," *Proc. Int. Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste held at Venice during April 14 - 1*, pp. 171–179, 1992.
- [20] J. Restrepo, "Multiple stage anaerobic composite system," *Proc. 5th Int.Symp. on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy*, pp. 315–320, 1988.
- [21] J. Alves, "Valorização de Resíduos por Co-digestão Anaeróbia," Tese de Mestrado em Sistemas de Energias Renováveis - Instituto Politécnico de Viana do Castelo, 2015.
- [22] M. Narendra Soni, "Investigating the Inhibitory Effects of Fats, Oils and Grease Addition on Fatty Acids Degradation During Anaerobic Co-Digestion," Degree Master of Science Environmental Engineering & Science - Clemson University, 2018.
- [23] J. Mata-Alvarez, S. Macé, and P. Llabrés, "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives," *Bioresour. Technology*, vol. 74, no. 1, pp. 3–16, 2000.
- [24] D. G. Cirne, X. Paloumet, L. Björnsson, M. M. Alves, and B. Mattiasson, "Anaerobic digestion of lipid-rich waste-Effects of lipid concentration," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 965–975, 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.04.003.
- [25] I. Angelidaki and B. K. Ahring, "Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge," *Biodegradation*, vol. 8, no. 4, pp. 221–226, 1997, doi: 10.1023/A:1008284527096.
- [26] L. Appels, J. Baeyens, J. Degre, and R. Dewil, "Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 755–781, 2008, doi: 10.1016/j.pecs.2008.06.002.
- [27] H. Bouallagui, R. Ben Cheikh, L. Marouani, and M. Hamdi, "Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester," *Bioresour. Technol.*, vol. 86, no. 1, pp. 85–89, 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(02)00097-4.
- [28] H. Bouallagui, Y. Touhami, R. Ben Cheikh, and M. Hamdi, "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes," *Process Biochem.*, vol. 40, no. 3–4, pp. 989–995, 2005, doi: 10.1016/j.procbio.2004.03.007.
- [29] J. Mata-Alvarez, P. Llabres, F. Cecchi, and P. Pavan, "Anaerobic digestion of the Barcelona central food market organic wastes: experimental study," *Bioresour. technology*, vol. v. 39 (1). 1992.
- [30] C. Li, P. Champagne, and B. C. Anderson, "Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermo-chemical pre-treatment," *Renew. Energy*, vol. 83, pp. 474–482, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.04.055.
- [31] J. H. Long, T. N. Aziz, F. L. D. L. Reyes, and J. J. Ducoste, "Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 3, pp. 231–245, 2012, doi: 10.1016/j.psep.2011.10.001.
- [32] Å. Davidsson, C. Lövestedt, J. la Cour Jansen, C. Gruvberger, and H. Aspegren, "Co-

- digestion of grease trap sludge and sewage sludge,” *Waste Management*, vol. 28, no. 6, pp. 986–992, 2008.
- [33] J. C. Kabouris *et al.*, “Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion of Municipal Sludge and Fat, Oil, and Grease,” *Water Environ. Res.*, vol. 81, no. 5, pp. 476–485, 2009, doi: 10.2175/106143008x357192.
- [34] J. C. Kabouris, U. Tezel, S. G. Pavlostathis, M. Engelmann, A. C. Todd, and R. A. Gillette, “The anaerobic biodegradability of municipal sludge and fat, oil, and grease at mesophilic conditions,” *Water Environ. Res. a Res. Publ. Water Environ. Fed.*, vol. 80, no. 3, pp. 212–221, Mar. 2008, doi: 10.2175/106143007x220699.
- [35] L. Martín-González, L. F. Colturato, X. Font, and T. Vicent, “Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 10, pp. 1854–1859, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.029.
- [36] S. Yalcinkaya and J. F. Malina, “Anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste for assessing direct feed of grease trap waste in municipal digesters,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 104, pp. 490–497, 2015, doi: 10.1016/j.ibiod.2015.08.007.
- [37] W. L. Chow *et al.*, “Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: A review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield,” *Processes*, vol. 8, no. 1. 2020, doi: 10.3390/pr8010039.
- [38] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. Pham Minh, and N. Lyczko, “Anaerobic co-digestion of food waste and FOG with sewage sludge—realising its potential in Ireland,” *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 75, no. 3, pp. 496–517, 2018, doi: 10.1080/00207233.2017.1380335.
- [39] C. Wan, Q. Zhou, G. Fu, and Y. Li, “Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 8, pp. 1752–1758, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.03.025.
- [40] R. M. Alqaralleh, K. Kennedy, R. Delatolla, and M. Sartaj, “Thermophilic and hyper-thermophilic co-digestion of waste activated sludge and fat, oil and grease: Evaluating and modeling methane production,” *J. Environ. Manage.*, vol. 183, no. Pt 3, pp. 551–561, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.003.
- [41] C. Noutsopoulos, D. Mamais, K. Antoniou, C. Avramides, P. Oikonomopoulos, and I. Fountoulakis, “Anaerobic co-digestion of grease sludge and sewage sludge: The effect of organic loading and grease sludge content,” *Bioresour. Technol.*, vol. 131, pp. 452–459, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.12.193.
- [42] G. Silvestre, Á. Rodríguez Abalde, B. Fernández, X. Flotats, and A. Bonmatí, “Biomass adaptation over anaerobic co-digestion of sewage sludge and trapped grease waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, pp. 6830–6836, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.019.
- [43] V. Razaviarani, I. D. Buchanan, S. Malik, and H. Katalambula, “Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste,” *J. Environ. Manage.*, vol. 123, p. 26–33, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.021.
- [44] S. Alanya *et al.*, “Anaerobic co-digestion of sewage sludge and primary clarifier skimmings for increased biogas production,” *Water Sci. Technol.*, vol. 67, no. 1, p.

- 174—179, 2013, doi: 10.2166/wst.2012.550.
- [45] R. Girault *et al.*, “Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and greasy sludge from flotation process: Batch versus CSTR experiments to investigate optimal design,” *Bioresour. Technol.*, vol. 105, pp. 1–8, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.024.
- [46] L. Pastor, L. Ruiz, A. Pascual, and B. Ruiz, “Co-digestion of used oils and urban landfill leachates with sewage sludge and the effect on the biogas production,” *Appl. Energy*, vol. 107, pp. 438–445, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.055.
- [47] J. Martinez, J. Fierro, M. E. Sánchez, and X. Gómez, “Anaerobic co-digestion of FOG and sewage sludge: Study of the process by Fourier transform infrared spectroscopy,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 75, pp. 1–6, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ibiod.2012.07.015.
- [48] L. Wang, T. Aziz, and F. De los Reyes, “Determining the limits of anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge with grease interceptor waste,” *Water Res.*, vol. 47, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.watres.2013.04.003.
- [49] O. Degrémont, *Instruções de Funcionamento da ETAR de Gaia*. 2003.
- [50] J. Martins, “Estudo de reator de digestão anaeróbia de lamas de ETAR,” Tese de Mestrado em Engenharia Química - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2019.
- [51] S. R. Qasim, *Wastewater treatment plants : planning, design, and operation*. Boca Raton: CRC, 1999.

ANEXOS

ANEXO A – CÁLCULO DA PROPORÇÃO DE LAMAS NOS ENSAIOS

ANEXO B – CÁLCULO DA QUANTIDADE TOTAL DE BIOGÁS ESPERADO

ANEXO C – CÁLCULO DA QUANTIDADE MÁSSICA DO RESÍDUO

ANEXOS

ANEXO A – Cálculo da proporção de lamas nos ensaios

Relativamente ao digestor real, ou seja, o existente na ETAR, o volume é de 4000 m³, sendo a alimentação de 300 m³ de lamas (lama mista composta por cerca de 60% de lama primária e 40% de lama secundária) diariamente. Na instalação em escala de laboratório o volume útil usado foi de 400 mL, e o inóculo usado era proveniente do digestor real. Ou seja, 300 m³ irá equivaler a 7,5% do volume total do reator.

Para o cálculo das proporções a usar nos ensaios, considerou-se que a percentagem de inóculo a usar seria de 50%, muito inferior ao que acontece no digestor real, de forma a permitir avaliar melhor o impacto da adição do substrato à mistura, sendo os outros 50%, correspondentes a lama primária, lama secundária e ao co-substrato (FOG), onde se iria manter a mesma proporção de lama primária/lama secundária, variando apenas a percentagem de adição de co-substrato. Na Tabela A.1 encontram-se os volumes correspondentes a cada componente.

Exemplo de cálculo para os constituintes do ensaio com 2% de FOG:

$$\text{Inóculo} = 0,5 \times 400 \text{ mL} = 200 \text{ mL}$$

$$L. \text{ Primária}(l. \text{ espessada}) = 0,6 \times 0,98 \times 200 \text{ mL} = 117,6 \text{ mL}$$

$$L. \text{ Secundária}(l. \text{ flotada}) = 0,40 \times 0,98 \times 200 \text{ mL} = 78,4 \text{ mL}$$

$$\text{Substrato}(FOG) = 0,02 \times 200 \text{ mL} = 4 \text{ mL}$$

Tabela A.1 Volume de cada componente presente no reator

Reatores	Inóculo (Lama Digestor) (mL)	Lama Mista		Co-substrato (FOG) (mL)	Volume total do reator (mL)
		Lama Primária (lama espessada)	Lama Secundária (lama flotada)		
Branco	200,0	120,0	80,0	-	400,0
1% FOG	200,0	118,8	79,2	2,0	400,0
2% FOG	200,0	117,6	78,4	4,0	400,0
3% FOG	200,0	116,4	77,6	6,0	400,0
4% FOG	200,0	115,2	76,8	8,0	400,0
5% FOG	200,0	114,0	76,0	10,0	400,0
7% FOG	200,0	111,6	74,4	14,0	400,0

ANEXO B – Cálculo da quantidade total de biogás esperado

Nos ensaios realizados é essencial a medição da quantidade de biogás produzido; no entanto, devido à existência de fugas, o que foi medido pode não corresponder ao valor real produzido. O cálculo dos valores esperados, tem em conta a destruição dos sólidos voláteis presentes na mistura, permitindo assim identificar fugas ou outras anomalias presentes nos ensaios.

No caso do ensaio com 1%, para o reator Branco inicial temos de seguida a descrição dos cálculos efetuados para obter o valor de biogás esperado.

$$ST \text{ iniciais} = 22776 \text{ mg/L}$$

$$SV \text{ iniciais} = 18089 \text{ mg/L}$$

$$SV \text{ finais} = 11196 \text{ mg/L}$$

Inicialmente é calculada a quantidade de sólidos voláteis destruídos:

$$SV \text{ destruídos} = 18089 - 11196 = 6893 \text{ mg/L} = 6,89 \text{ g/L}$$

Sendo o volume de reator igual a 400 mL, os SV destruídos em kg/L, são dados por:

$$SV \text{ destruídos (kg)} = \frac{6,89 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times 0,400 \text{ L}}{1000} = 0,00275 \text{ kg}$$

Estando os valores de produção de biogás compreendidos entre 0,75 e 1 m³/kg de SV destruídos [51], optou-se por utilizar o valor mais baixo, ou seja, 0,75 m³/kg de SV destruídos, assim temos que:

$$Produção \text{ de biogás esperado} = 0,00275 \times 0,75 \times 1000 = 2,068 \text{ L}$$

Logo o valor esperado de produção de biogás para o reator Branco inicial é de 2,068 L.

ANEXO C – Cálculo da quantidade mássica do resíduo

Para uma melhor comparação dos valores de biogás esperados, procedeu-se ao cálculo da quantidade mássica de resíduos utilizados nos diferentes ensaios.

O cálculo da quantidade mássica, faz-se a partir do volume de resíduo utilizado e do valor de ST obtidos para o resíduo. O valor da quantidade mássica do resíduo utilizado em cada ensaio está presente na

Tabela C.1.

Tabela C.1 Quantidade mássica do resíduo

Reator	Volume de resíduo aplicado (mL)	ST (mg/L)	Quantidade mássica de resíduo aplicada (mg) (<i>volume</i> × <i>ST</i> /1000)
1%	2	42872	86
2%	4	132690	531
3%	6	108493	651
3%-1	6	53897	323
4%	8	132690	1 062
5%	10	108493	1 085
5%-1	10	53897	539
5%-2	10	117437	1 174
7%	14	117437	1 644