



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TÉCNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Luana Luciano Ferreira

**Avaliação da Atividade Metanogênica Específica (AME) do Reator UASB da
Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição em
Florianópolis/SC**

Florianópolis
2023

Luana Luciano Ferreira

**Avaliação da Atividade Metanogênica Específica (AME) do Reator UASB da
Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição em
Florianópolis/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Prof. Nelson Libardi Junior

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pela autora, através do Programa de Geração Automática da
Biblioteca Universitária da UFSC.

Ferreira, Luana Luciano

Avaliação da Atividade Metanogênica Específica (AME) do Reator UASB da Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição em Florianópolis/SC / Luana Luciano Ferreira ; orientador, Nelson Libardi Junior, 2023.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Atividade Metanogênica Específica. 3. Lodo Anaeróbico. 4. Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (UASB). 5. Biogás. I. Junior, Nelson Libardi . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Luana Luciano Ferreira

**Avaliação da Atividade Metanogênica Específica (AME) do Reator UASB da
Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição em
Florianópolis/SC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira Sanitarista e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 05 de dezembro de 2023.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.
Orientador
Instituição UFSC

Prof^a. Camila Michels, Dra.
Avaliadora
Instituição UFSC

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.
Avaliador
Instituição UFSC

Dedico este trabalho, que marca o fim de um ciclo, à Deus, por todas as portas que Ele abriu para que isso fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Chegar ao fim do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental marca a realização de um sonho, e em anos de dedicação pude contar com muito suporte, o que me trouxe até este momento.

Agradeço à Deus, por me permitir alcançar meus objetivos e por demonstrar que Seus planos são sempre maiores que os meus. Ainda, agradeço por ser minha luz nos dias difíceis. Obrigada também à minha Mãe Maria, por todo cuidado e proteção.

Agradeço aos meus pais Renato Junior e Carla Luciano, por não medirem esforços para tornar minha graduação possível. Obrigada por serem sempre meu suporte, por sonharem junto comigo e por sempre me lembrarem o quanto me amam, especialmente nos dias em que era difícil estar longe da família. Serei infinitamente grata por tudo isso, espero um dia poder retribuir tamanho carinho.

Agradeço a todos os membros da minha família, por todo apoio e vibração a cada conquista. Nossos momentos juntos sempre recarregaram minhas energias.

Agradeço ao meu parceiro de vida, Kevin Paloschi, por todo suporte durante estes anos. Obrigada por todo amor e paciência, ter você ao meu lado significou muito. Agradeço por ter me proporcionado momentos tão maravilhosos, a certeza de ter você me esperando sempre foi o meu gás para enfrentar meus objetivos durante as semanas difíceis.

Agradeço a todos os amigos que encontrei durante essa jornada, sem vocês teria sido muito mais difícil. Obrigada a minha grande amiga Elizabeth Soethe, minha parceira de lar e de vida, seu apoio foi essencial para que eu me sentisse capaz. Obrigada as minhas amigas Camila Bruhl, Julia Lucion e Rafaela Borth, que são minhas companheiras desde o início da graduação, esse é só o início de tudo que ainda está por vir para todas nós.

Agradeço a todos profissionais da Universidade Federal de Santa Catarina, os quais contribuíram para minha formação. Em especial, agradeço meu orientador Nelson Libardi, um professor exemplar e inspirador, aprendi muito com você! Ainda, agradeço ao professor Paulo Belli, que disponibilizou recursos para que esta pesquisa fosse possível. Agradeço também a todos que de alguma forma me ajudaram na realização do meu TCC, em especial à Bianca, Sofia Milanelo, Sofia Kremer e Patrick Aubert, que foram muito importantes para execução das atividades laboratoriais.

Não poderia deixar que agradecer a minha avó Maria Aparecida, meu avô Antônio Ferreira, minha bisavó Aparecida da Silva e meu dindo querido Fernando Careta. Vocês sempre foram meus incentivadores, em diferentes momentos da minha vida. Tenho certeza que de algum lugar, vocês estão olhando por mim.

A todos vocês, essa conquista é nossa! Obrigada por tanto.

Por fim, agradeço a Luana de 2018, que teve a coragem de enfrentar esse desafio! Nós conseguimos e eu não poderia estar mais feliz!

RESUMO

A digestão anaeróbia em um reator depende de condições ambientais específicas, que devem ser controladas no processo de tratamento de efluentes, garantindo sua efetividade. Em sistemas anaeróbios eficientes, cerca de 70 a 90% da matéria orgânica biodegradável é convertida em biogás, especialmente em dióxido de carbono e metano. A remoção de substratos orgânicos no efluente está altamente relacionada com a produção de metano. Em Florianópolis, a Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição utiliza da tecnologia do reator UASB para tratamento dos efluentes. A ETE foi sujeita à algumas alterações com o passar dos anos, como aumento da demanda por conta de ampliações na rede coletora do bairro da Lagoa da Conceição, além da incorporação de tratamento terciário para remoção de fósforo através da adição de Policloreto de Alumínio (PAC). O objetivo do estudo foi analisar a Atividade Metanogênica Específica do lodo coletado do reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição, quantificando e caracterizando qualitativamente o biogás gerado durante o teste. Ainda, avaliou-se o potencial de inibição do PAC na atividade metanogênica. O trabalho determinou AME por método volumétrico com tubos eudiômetros, seguido da caracterização do biogás com um analisador de gases portátil. Os frascos reatores foram submetidos a condições experimentais controladas, com temperatura de 30°C, utilização de solução de nutrientes e adição de diferentes substratos (mistura de AGV, glicose e acetato de sódio). Os testes preliminares demonstraram baixa geração de biogás e instabilidade dos sistemas com substrato de AGV. A aplicação de glicose resultou em uma AME de 0,011gDQO_{CH4}/gSSV.d e um volume acumulado de metano de 4,15mL em 46 horas. Nesse caso, a diminuição de pH das amostras demonstrou acúmulo de AGV no sistema. Já a aplicação de acetato se mostrou mais lenta, porém mais efetiva, com um volume de metano acumulado de 9,15mL e taxa de AME de 0,004gDQO_{CH4}/gSSV.d. A composição do biogás demonstrou valores de porcentagem de metano abaixo do esperado para todos os substratos, entre 3,3 e 4,0% nos reatores com glicose e entre 11,5 e 15,2% para acetato. Assim, a biomassa avaliada não se mostrou eficiente para suportar a carga orgânica aplicada na ETE. O PAC, por sua vez, não gerou inibição da atividade metanogênica nas concentrações 108mg/L e 650mg/L. Já a concentração 26000mg/L de PAC, evidenciou a inibição da atividade das metanogênicas devido ao acúmulo excessivo de PAC no sistema, sendo uma preocupação futura para a ETE da Lagoa da Conceição.

Palavras-chave: Atividade Metanogênica Específica; Lodo Anaeróbio; Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (UASB); Biogás; Digestão anaeróbia.

ABSTRACT

Anaerobic digestion in a reactor depends on specific environmental conditions, which must be controlled in the effluent treatment process, ensuring its effectiveness. In efficient anaerobic systems, around 70 to 90% of biodegradable organic matter is converted into biogas, especially carbon dioxide and methane. The removal of organic substrates in the effluent is highly related to the production of methane. In Florianópolis, the Lagoa da Conceição Effluent Treatment Plant uses UASB reactor technology to treat effluents. The ETP was subject to some changes over the years, such as increased demand due to expansions in the sewage collection system in the Lagoa da Conceição neighborhood, in addition to the incorporation of tertiary treatment to remove phosphorus through the addition of Aluminum Polychloride (PAC). The objective of the study was to analyze the Specific Methanogenic Activity of the sludge collected from the UASB reactor of the Lagoa da Conceição ETP, quantifying and qualitatively characterizing the biogas generated during the test. Furthermore, the inhibition potential of PAC on methanogenic activity was evaluated. The work determined SMA using a volumetric method with eudiometer tubes, followed by biogas characterization with a portable gas analyzer. The reactor flasks were subjected to controlled experimental conditions, with a temperature of 30°C, use of nutrient solution and addition of different substrates (mixture of VFA, glucose and sodium acetate). Preliminary tests demonstrated low biogas generation and instability of systems with VFA substrate. The application of glucose resulted in an SMA of 0.011gDQOCH₄/gSSV.d and an accumulated methane volume of 4.15mL in 46 hours. In this case, the decrease in pH of the samples demonstrated the accumulation of VFA in the system. The application of acetate proved to be slower, but more effective, with an accumulated methane volume of 9.15mL and an SMA rate of 0.004gDQOCH₄/gSSV.d. The biogas composition demonstrated methane percentage values below expectations for all substrates, between 3.3 and 4.0% in reactors with glucose and between 11.5 and 15.2% for acetate. Therefore, the biomass evaluated was not efficient to support the organic load applied at the ETP. PAC, in turn, did not generate inhibition of methanogenic activity at concentrations 108mg/L and 650mg/L. The concentration of 26000mg/L of PAC, on the other hand, showed the inhibition of methanogenic activity due to the excessive accumulation of PAC in the system, being a future concern for the Lagoa da Conceição ETP.

Keywords: Specific Methanogenic Activity; Anaerobic Sludge; Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB); Biogas; Anaerobic Digestion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhos metabólicos e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	19
Figura 2 - Representação esquemática do reator UASB	30
Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura das arqueias metanogênicas.....	33
Figura 4 - Padrões típicos de inibição e toxicidade na digestão anaeróbia.....	39
Figura 5 - Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição	40
Figura 6 - Processo de tratamento de efluentes – ETE Lagoa da Conceição.....	41
Figura 7 - Sistema de Tubos Eudiômetros	46
Figura 8 - Sistema de Medição do Biogás.....	47
Figura 9 - Análise gráfica da taxa máxima de produção de metano.....	53
Figura 10 - Volume de biogás acumulado no Teste 1	56
Figura 11 - Volume de biogás acumulado no Teste 2	57
Figura 12 - Volume de biogás acumulado no Teste 3.....	58
Figura 13 - Média de produção de CH ₄ – Acetato de Sódio.....	59
Figura 14 - Média de produção de CH ₄ - Glicose.....	60
Figura 15 - Volume de biogás produzido no Teste 4.....	61
Figura 16 - Média de produção de CH ₄ – Glicose (Teste 4).....	62
Figura 17 - Frascos reatores com glicose após o período de incubação	63
Figura 18 - Média de produção de CH ₄ – Acetato (Teste 4).....	65
Figura 19 - Frascos reatores com acetato após o período de incubação.....	66
Figura 20: Avaliação da inibição de AME através do PAC – Lodo UASB	70
Figura 21: Frascos reatores após teste de inibição – Lodo UASB	71
Figura 22: Avaliação da inibição de AME através do PAC – Lodo UASB	72
Figura 23: Frascos reatores após teste de inibição – Esterco Bovino.....	73
Figura 24 - Identificação dos microrganismos lodo UASB – ETE Lagoa da Conceição	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Morfologia de algumas arqueias metanogênicas	33
Quadro 2 - Solução de Nutrientes no Teste 1	49
Quadro 3 - Solução de Nutrientes Testes 2, 3 e 4	49
Quadro 4 - Resumo das condições de montagem dos reatores	51
Quadro 5 - Resumo das condições de montagem dos reatores	52
Quadro 6: Resumo dos resultados do teste de inibição com PAC	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das bactérias metanogênicas	25
Tabela 2 - Efeitos do nitrogênio amoniacal/amônia no reator anaeróbio	27
Tabela 3 - Efeito do alumínio na digestão anaeróbia	29
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do Reator UASB	31
Tabela 5 - Composição típica de biogás em reatores anaeróbios.....	34
Tabela 6 - Teor de Sólidos do Inóculo.....	54
Tabela 7 - Resumo de Resultados Teste AME e Comparação com Literatura	68
Tabela 8 - Composição preliminar do biogás (Teste 3).....	75
Tabela 9 - Composição do biogás – Teste 3	76
Tabela 10 - Composição do biogás – Teste 4	76
Tabela 11 - Composição do biogás – Teste com PAC.....	78

LISTA DE SIGLAS

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

AME – Atividade Metanogênica Específica

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

PAC – Policloreto de Alumínio

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

UASB – *Upflow Anaerobic Sluge Blanket* (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PRINCÍPIOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	18
2.1.1	Hidrólise e acidogênese	19
2.1.2	Acetogênese	20
2.1.3	Metanogênese	21
2.1.4	Redução de Sulfato	22
2.2	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO	22
2.3	FATORES QUE AFETAM A DIGESTÃO ANAERÓBIA	23
2.3.1	pH e Alcalinidade	23
2.3.2	Temperatura	24
2.3.3	Nutrientes	24
2.3.4	Toxicidade	25
2.4	REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE (UASB)	30
2.5	ASPECTOS DO LODO ANAERÓBIO	32
2.5.1	Microbiologia do lodo anaeróbio	32
2.6	CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS	34
2.7	PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA.....	34
2.7.1	Medição do Biogás no Teste AME	37
2.8	AVALIAÇÃO DA INIBIÇÃO DA ATIVIDADE METANOGÊNICA	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	ÁREA DE ESTUDO	39
3.2	COLETA E ARMAZENAMENTO DO INÓCULO	41
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO	42
3.3.1	Série de Sólidos	42
3.3.2	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	45
3.4	TESTE DA ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA	45
3.4.1	Sistema de Medição do Biogás	45

3.4.2	Montagem dos experimentos.....	48
3.4.3	Avaliação da Inibição da Atividade Metanogênica pelo Uso do PAC... 	51
3.4.4	Cálculos da Atividade Metanogênica Específica	52
3.5	CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DO BIOGÁS.....	54
3.6	MICROSCOPIA DO LODO ANAERÓBIO	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO	54
4.2	CALIBRAÇÃO DO MÉTODO TESTE AME.....	55
4.3	TESTE DA ATIVIDADE METANOGENICA ESPECÍFICA COM LODO DO REATOR UASB.....	60
4.4	AVALIAÇÃO DA INIBIÇÃO DA ATIVIDADE METANOGENICA POR POLICLORETO DE ALUMÍNIO.....	69
4.5	CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DO BIOGÁS.....	74
4.5.1	Composição do biogás – Testes de Inibição por PAC	78
4.6	IDENTIFICAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS MICRORGANISMOS PRESENTES NO LODO ANAERÓBIO.....	79
5	CONCLUSÃO	82

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de microrganismos para o tratamento de efluentes reproduz processos que ocorrem naturalmente no meio ambiente. No entanto, o tratamento biológico dispõe de tecnologias para purificação da água residuária através de condições controladas, gerando taxas de eficiência mais altas em comparação ao meio natural, permitindo a ocorrência do processo biológico de maneira compactada (Von Sperling, 2007).

O reator UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket reactor*) é uma tecnologia que tem sido amplamente utilizada no tratamento de efluentes, fazendo uso dos princípios da digestão anaeróbia. O processo consiste no fluxo ascendente de águas residuárias através de um leito de lodo com alta atividade microbiana. Um dos princípios do reator UASB é a separação dos gases contidos na mistura líquida, propiciando um ambiente favorável à sedimentação (Chernicharo, 2007).

Em sistemas anaeróbios, cerca de 70 a 90% da matéria orgânica biodegradável é convertida em biogás, especialmente dióxido de carbono e metano (Chernicharo, 2007). Sendo assim, a remoção de substratos orgânicos do efluente está altamente relacionada com a produção de metano (Aquino et al., 2007). A avaliação da atividade metanogênica específica (AME) de um lodo anaeróbio é capaz de monitorar a eficiência da população de bactérias metanogênicas no reator, que atuam na fase final da degradação anaeróbia, se caracterizando assim como uma ferramenta de controle operacional (Aquino et al., 2007)

A digestão anaeróbia em um reator depende de condições ambientais específicas, as quais devem ser controladas no processo de tratamento de efluentes, garantindo sua efetividade. Sobretudo, as bactérias metanogênicas são organismos sensíveis, com longos tempos de regeneração e crescimento mais lento se em comparação com outras bactérias presentes no lodo. Desta forma, alguns dos fatores que devem ser controlados em um reator são: pH, temperatura, nutrientes e a presença de substâncias químicas capazes de inibir a atividade microbiana (Zupančič; Grilc, 2012).

No município de Florianópolis, especificamente no bairro da Lagoa da Conceição, localiza-se a Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição. Os efluentes recebidos pela ETE são direcionados para tratamento em reatores biológicos, sendo um aeróbio e um anaeróbio – o reator UASB. Devido ao crescimento

populacional na região da Lagoa da Conceição, seu sistema de esgotamento sanitário sofreu ampliações na área de abrangência de rede coletora de esgoto, bem como na capacidade de tratamento da ETE (Santos, 2018).

No dia 25 de janeiro de 2021, após chuvas intensas na região da Lagoa da Conceição, o talude de areia responsável pela sustentação da lagoa de evapoinfiltração, local de disposição final do efluente, foi rompida. O acidente causou a inundação das áreas ao entorno da ETE, além da disposição de volume significativo de efluente tratado na Lagoa da Conceição (Savi, 2022). O efluente, mesmo que tratado, apresentava altas concentrações de nutrientes, além da presença de hormônios, metais e detritos (PES, 2021).

A disposição excessiva de nutrientes em ambiente lagunar tende a provocar impactos ambientais severos, especialmente por conta da eutrofização, que resulta em declínio da biodiversidade, alteração de cadeias alimentares e danos à saúde humana (Silva, 2016). Nesse sentido, a CASAN adotou novos processos para promover a remoção de nutrientes do efluente recebido na ETE da Lagoa da Conceição, principalmente fósforo e nitrogênio (CASAN, 2021).

Visando a remoção de fósforo no efluente, implantou-se na ETE o processo de Precipitação Química, inserindo um agente coagulante para aderência das moléculas de fósforo, resultando na precipitação do nutriente para posterior remoção no momento de retirada do lodo (CASAN, 2021). Tendo em consideração o layout da ETE da Lagoa da Conceição, o processo de recirculação de lodo do decantador secundário propicia que parte desse lodo, com resquícios de coagulante químico, seja encaminhado para o reator anaeróbio (UASB).

Diante deste contexto, o presente trabalho propõe-se a analisar a Atividade Metanogênica Específica do lodo biológico retirado do reator UASB da Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição, localizada em Florianópolis/SC. O lodo foi submetido à ensaios laboratoriais e, a partir dos resultados obtidos, foi avaliado o metabolismo da biomassa a partir da produção de biogás, além da avaliação da inibição da atividade metanogênica pela adição de PAC.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho possui como objetivo geral analisar a Atividade Metanogênica Específica da biomassa do Reator UASB da Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição, localizada em Florianópolis/SC.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir procedimento de teste de Atividade Metanogênica Específica com base em literatura e testes práticos preliminares;
- Analisar a Atividade Metanogênica Específica do lodo do Reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição;
- Quantificar e caracterizar qualitativamente o biogás gerado no teste AME;
- Avaliar o potencial de inibição do Policloreto de Alumínio (PAC) na Atividade Metanogênica Específica do lodo retirado da ETE, bem como do lodo bovino;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

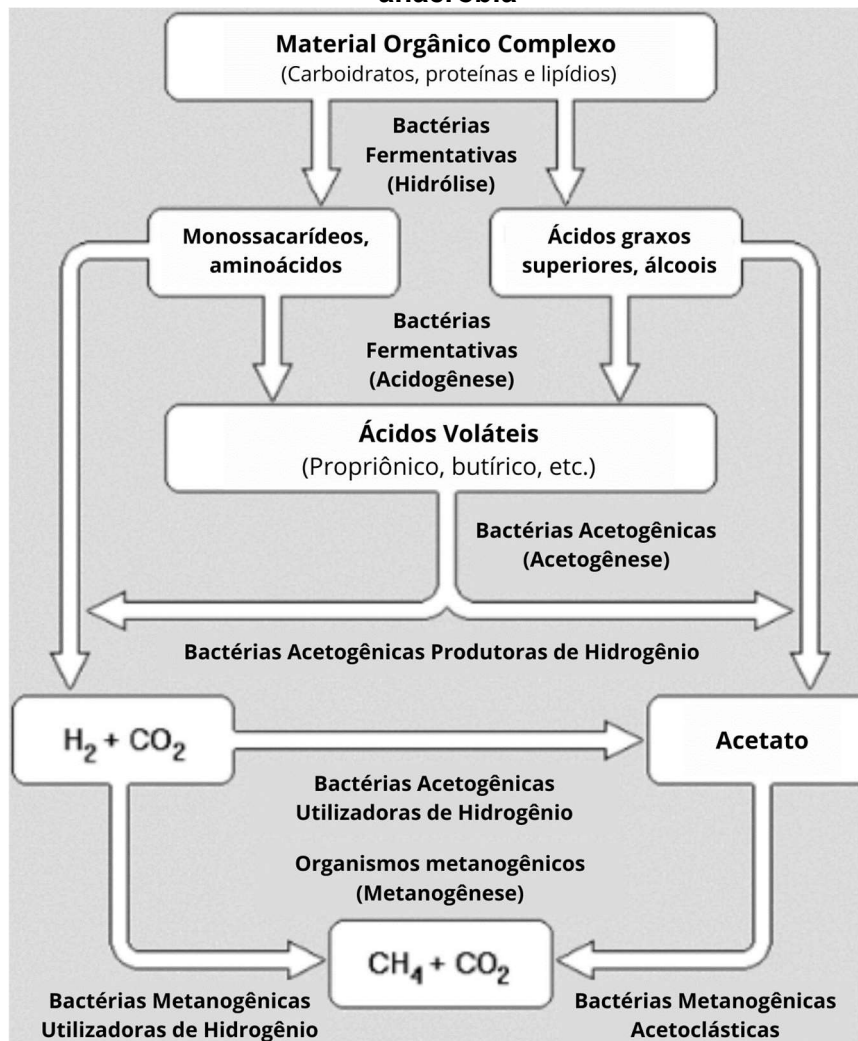
2.1 PRINCÍPIOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo biológico, que ocorre na ausência de oxigênio molecular, transformando compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em metano e dióxido de carbono, considerados materiais orgânicos mais simples. O processo em questão retrata um sistema ecológico em equilíbrio, no qual diferentes populações de microrganismos apresentam funções especializadas e atuam em uma cadeia sequencial de percursos metabólicos, resultando na degradação da matéria orgânica (Zeikus, 1980 apud Alves, 1998; Chernicharo, 2007; PROSAB, 1999).

O tratamento de efluentes por meio da digestão anaeróbia consiste no princípio que a maior parte dos produtos gerados nesse processo são gases, que se desprendem da água residuária, formando o biogás. Assim, a matéria orgânica presente na fase líquida é removida através da sua transferência para fase gasosa (PROSAB, 1999). A digestão anaeróbia é considerada um processo de duas etapas, sendo a primeira realizada por bactérias anaeróbicas e facultativas, as quais convertem a matéria orgânica complexa em ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e gás hidrogênio (Chernicharo, 2007).

A segunda etapa, consiste na atuação do grupo de bactérias metanogênicas, a qual depende do substrato gerado na etapa anterior. Dessa forma, os ácidos orgânicos, bem como o hidrogênio, são convertidos em metano e dióxido de carbono (Chernicharo, 2007). As duas etapas da digestão anaeróbia podem ser subdivididas em uma série de caminhos metabólicos, especialmente a hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e redução de sulfato.

Figura 1 - Caminhos metabólicos e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

2.1.1 Hidrólise e acidogênese

A hidrólise é a primeira etapa da digestão anaeróbia. O processo consiste na conversão de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos, através da ação de exoenzimas, que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Essa etapa é essencial para que as moléculas dos materiais dissolvidos possam penetrar nas membranas celulares das bactérias fermentativas (Chernicharo, 2007). De acordo com Alves (1998), a hidrólise é normalmente um processo lento e sua velocidade pode variar de acordo com o tipo de substrato. A presença de substratos complexos pode tornar a etapa da hidrólise um fator limitante na velocidade do processo de degradação anaeróbia.

Após a hidrólise, os materiais dissolvidos são metabolizados nas células das bactérias fermentativas no processo denominado acidogênese. Os produtos gerados nessa etapa incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio e novas células bacterianas (Chernicharo, 2007). A acidogênese conta com um grande e diverso grupo de bactérias fermentativas, que representam aproximadamente 90% da população bacteriana dos digestores anaeróbios (Zeikus, 1980 apud Alves, 1998; Chernicharo, 2007).

De acordo com PROSAB (1999), a maior parte das bactérias fermentativas da etapa de acidogênese são anaeróbias obrigatórias. No entanto, há a presença de algumas espécies facultativas que podem metabolizar a matéria orgânica por vias oxidativas. Em sistemas de tratamento de efluentes por meios anaeróbios, faz-se importante a presença de bactérias acidogênicas facultativas, tendo em vista o seu papel na remoção de oxigênio dissolvido, eventualmente presente, que é uma substância potencialmente tóxica para bactérias metanogênicas.

2.1.2 Acetogênese

A etapa da acetogênese consiste na atuação das bactérias acetogênicas, na qual realiza-se a oxidação dos produtos gerados na acidogênese em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos. Portanto, nessa fase são gerados ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (Chernicharo, 2007). Em termos de DQO digerida, aproximadamente 70% desta é convertida em ácido acético, sendo que os 30% restante da DQO é concentrado no hidrogênio formado (PROSAB, 1999).

A formação de hidrogênio nesta etapa é responsável pelo decaimento de pH no meio. De acordo com Chernicharo (2007), há duas formas de consumo do hidrogênio formando, sendo a primeira delas pelos microrganismos metanogênicos, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono na produção de metano. Já a segunda alternativa é na formação dos ácidos propiônico e butírico, que se formam com a reação entre o hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético.

2.1.3 Metanogênese

A última etapa do processo de degradação anaeróbia é a metanogênese, no qual as bactérias metanogênicas utilizam os substratos previamente gerados (ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono) para produção de metano e dióxido de carbono. Há dois grupos atuantes na metanogênese, sendo os microrganismos que geram metano a partir do ácido acético ou metanol (bactérias metanogênicas acetoclásticas) e aqueles que produzem metano a partir do hidrogênio e dióxido de carbono (bactérias metanogênicas hidrogenotróficas) (Chernicharo, 2007).

2.1.3.1 *Metanogênicas Acetoclásticas*

As bactérias metanogênicas acetoclásticas são responsáveis por 60% a 70% da produção de metano na digestão anaeróbia, utilizando como substrato o ácido acético e grupo metila (Chernicharo, 2007). De acordo com Gerardi (2003), as metanogênicas acetoclásticas se reproduzem em velocidade inferior às metanogênicas hidrogenotróficas. Além disso, elas são afetadas pelo acúmulo de hidrogênio, necessitando um controle de baixa pressão de hidrogênio no reator. Condições de alta pressão de hidrogênio são prejudiciais às metanogênicas acetoclásticas, reduzindo a produção de metano.

Segundo Alves (1998), as bactérias que produzem metano a partir do acetato, são o elo mais fraco da digestão anaeróbia, tendo em vista sua baixa capacidade de resistência a condições adversas, como choques orgânicos e hidráulicos, bem como a presença de substâncias tóxicas.

2.1.3.2 *Metanogênicas Hidrogenotróficas*

As bactérias metanogênicas hidrogenotróficas utilizam hidrogênio para converter dióxido de carbono em metano. Durante esse processo, essas bactérias ajudam a manter uma baixa pressão de hidrogênio no reator, criando condições ideais para a atuação das metanogênicas acetoclásticas (Gerardi, 2003).

2.1.4 Redução de Sulfato

Os processos que ocorrem nos reatores anaeróbios não se reduzem à somente aqueles que levam à produção de biogás. De acordo com PROSAB (1999), mesmo sem a presença de oxigênio dissolvido, pode-se encontrar oxidantes alternativos que permitem o desenvolvimento de bactérias que usam o catabolismo oxidativo, como o nitrato e o sulfato. Normalmente, o teor que nitrato encontrado em efluentes sanitários é baixa, já o processo de redução de sulfato para sulfeto é um processo importante na prática.

O sulfato pode ser encontrado no esgoto sanitário em altas concentrações, tendo em vista sua presença natural na água, bem como os processos industriais que utilizam formas de sulfato. Sendo assim, o sulfato oxida material orgânico que seria transformado em metano, e gera gás sulfídrico (H₂S). Esse processo é indesejável em reatores anaeróbios, pois o gás sulfídrico tem caráter corrosivo, bem como confere odor desagradável na fase líquida e como biogás. Ainda, o H₂S pode ser uma substância tóxica no processo de metanogênese (PROSAB, 1999).

2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO

A estimativa de produção de metano durante a degradação anaeróbia pode ser avaliada através da Equação 1 (Chernicharo, 2007):



Portanto, a remoção de 64g de DQO da água residuária correspondem à produção de 16g de metano, que correspondem à 350mL de metano em condições normais de temperatura e pressão. A expressão que demonstra a determinação teórica de produção de metano está descrita na Equação 2 (Chernicharo, 2007).

$$V_{\text{CH}_4} = \text{COD}_{\text{CH}_4} / K \text{ (t)} \quad (2)$$

Onde: V_{CH_4} – Volume de metano produzido (L)

COD_{CH_4} – DQO removida no reator e convertida em metano (gDQO)

K (t) – Fator de correção

$$K(t) = (P \cdot K) / (R \cdot (273 + T)) \quad (3)$$

Onde: P – Pressão atmosférica (1 atm)

K = DQO correspondente a 1 mol de CH₄ (64gDQO/mol)

R – Constante do gás (0,08206 atm.L/mol.°K)

T – Temperatura operacional do reator (°C)

2.3 FATORES QUE AFETAM A DIGESTÃO ANAERÓBIA

2.3.1 pH e Alcalinidade

O pH é uma das condições ambientais importantes em reatores anaeróbios, dado que este fator afeta a taxa de crescimento dos microrganismos, causando alterações na constituição microbiana dos consórcios. Tendo em vista que o processo de digestão anaeróbia conta com grupos distintos de bactérias em cada uma das suas etapas, é importante compreender o pH que maximiza a eficiência global do processo (Alves, 1998).

As bactérias metanogênicas possuem crescimento considerado ótimo quando o pH está entre 6,6 e 7,4, porém estas também consigam estabilidade em uma faixa entre 6,0 e 8,0. Já as bactérias acidogênicas possuem um bom crescimento com o pH entre 5,0 e 6,0 (Prampero, 2017). De acordo com Chernicharo (2007), a operação do reator anaeróbio deve estar entre 6,5 e 8,0, caso contrário, a produção de metano será severamente afetada.

Durante o processo de digestão anaeróbia, a geração de subprodutos com os ácidos voláteis, podem provocar a descida do pH do meio, caso não exista alcalinidade suficiente no sistema. Sendo assim, a alcalinidade é uma medida da capacidade tampão do processo, permitindo que o pH se mantenha dentro do ideal mesmo com a geração de ácidos graxos voláteis (Alves, 1998).

2.3.2 Temperatura

De acordo com PROSAB (1999), a temperatura é um dos fatores mais importantes nos processos de degradação anaeróbia. A temperatura do reator é capaz de causar alterações na velocidade do metabolismo dos microrganismos, além de afetar o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos, principalmente dos lipídios.

O crescimento microbiano está relacionado com três faixas de temperatura, a faixa psicofílica (entre 4°C e 15°C), faixa mesofílica (entre 20°C e 40°C) e a faixa termofílica (entre 45°C e 70°C) (Batstone et al., 2002 apud Chernicharo, 2007). No entanto, a temperatura ideal em reatores anaeróbios está na fase mesofílica, entre 30°C e 35°C, na qual o sistema se torna mais estável e com bom crescimento bacteriano (Prampéro, 2017).

Ainda, durante a operação de reatores anaeróbios, é essencial que a temperatura seja estável, tendo em vista que mudanças bruscas de temperatura podem afetar a atividade bacteriana, especialmente das bactérias metanogênicas (Turovskiy, 2006 apud Vieira, 2017). De acordo com Gerardi (2003), flutuações na temperatura dos reatores anaeróbios pode criar um cenário vantajoso para alguns grupos microbianos e desvantajoso para outros.

2.3.3 Nutrientes

O processo da metanogênese é considerada uma etapa limitante da degradação anaeróbia, sendo assim, um dos pontos chaves para assegurar a eficiência do reator é garantir os requisitos nutricionais do grupo trófico envolvido nessa fase (Alves, 1998). De acordo com PROSAB (1999), os nutrientes essenciais para digestão anaeróbia são o Nitrogênio (N) e o Fósforo (P), além disso, o Enxofre (S) também é um nutriente importante, especialmente para as metanogênicas.

A necessidade nutricional das bactérias responsáveis pela degradação anaeróbia está relacionada com a composição química das suas células microbianas. A Tabela 1 apresenta os macro e micro nutrientes que compõem os microrganismos metanogênicos.

Tabela 1 - Composição química das bactérias metanogênicas

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Concentração (g/kg SST)	Elemento	Concentração (mg/kg SST)
Nitrogênio	65	Ferro	1800
Fósforo	15	Níquel	100
Potássio	10	Cobalto	75
Enxofre	10	Molibdênio	60
Cálcio	4	Zinco	60
Magnésio	3	Manganês	20
		Cobre	10

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

Os nutrientes devem estar presentes no reator em quantidades suficientes para que o crescimento microbiano ocorra de maneira efetiva. Em situações de escassez nutricional, os reatores podem necessitar de suplementação durante o processo de tratamento, garantindo a eficiência do sistema (Chernicharo, 2007).

Os efluentes sanitários de origem doméstica normalmente apresentam macronutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, em quantidades suficientes para suprir a necessidade nutricional dos microrganismos presentes no reator anaeróbio. Portanto, a deficiência nutricional é uma causa pouco provável de limitação da digestão anaeróbia. Todavia, a pouca disponibilidade de ferro no esgoto sanitário é uma possível exceção, a qual pode ser um fator limitantes na atividade metanogênica (Chernicharo, 2007; PROSAB, 1999).

2.3.4 Toxicidade

Há uma gama de compostos orgânicos e inorgânicos capazes de causar toxicidade para os microrganismos do processo de digestão anaeróbia e, dependendo da concentração, a atividade microbiana pode ser altamente inibida. As bactérias metanogênicas são mais facilmente inibidas por toxinas, tendo em vista a pequena conversão de substrato em novas células, além do longo período de geração desses microrganismos (Chernicharo, 2007).

No entanto, a capacidade de assimilação de cargas tóxicas em reatores anaeróbios está relacionada com a operação do reator. De acordo com (PROSAB, 1999), o tempo de retenção celular e a idade de lodo influenciam na capacidade de

adaptação às substâncias tóxicas. Quanto maior o tempo de retenção celular, maior é a capacidade do reator de assimilar cargas tóxicas.

2.3.4.1 *Sulfato de Hidrogênio*

O sulfato de hidrogênio é um dos compostos mais tóxicos nos reatores anaeróbios. Por mais que as células bacterianas necessitem de enxofre solúvel como nutriente de crescimento, concentrações excessivas de sulfetos podem ser fonte de toxicidade. A toxicidade de sulfeto é normalmente associada ao H₂S, tendo em vista sua facilidade de penetração nas moléculas neutras através da membrana celular e sua reatividade com os componentes celulares (Gerardi, 2003; VIEIRA, 2017).

O sulfato de hidrogênio tem capacidade de inibição da atividade das bactérias anaeróbias, podendo ocorrer em concentração próximas de 200mg/L (Gerardi, 2003). Segundo Chen et al. (2014), a toxicidade do sulfeto para as bactérias metanogênicas é proporcional à sua concentração em substrato e concentração de H₂S em fase gasosa.

2.3.4.2 *Amônia*

Efluentes sanitários ricos em compostos à base de ureia ou proteínas tendem a apresentar bicarbonato de amônia após o processo de digestão anaeróbia. Essa fonte nitrogênio pode ser benéfica ao reator anaeróbio, bem como atua como tampão para mudanças de pH. Já as formas reduzidas de nitrogênio, como nitrogênio amoniacal ou íons de amônia, que podem ser transferidos ao reator biológico ou produzidos durante degradação anaeróbia, apresentam efeitos adversos aos microrganismos (Chernicharo, 2007; Gerardi, 2003).

O íon de amônia (NH₄⁺) e a amônia livre (NH₃) possuem características de inibição da atividade bacteriana quando presentes em altas concentrações, afetando especialmente as bactérias metanogênicas. A concentração destas duas formas de amônia é dependente do pH do meio. Quando o pH se encontra abaixo de 7,2, a inibição ocorre por conta do íon de amônia, já em pH maior do que 7,2, o causador de inibição é a amônia livre (Chernicharo, 2007). A equação 4 demonstra esse equilíbrio:



De acordo com Gerardi (2003), a variação da concentração de amônia livre está relacionada com diferentes condições operacionais do reator, como por exemplo a alcalinidade, a capacidade tampão do sistema e a temperatura. A Tabela 2 demonstra o efeito da amônia no reator anaeróbio em diferentes concentrações.

Tabela 2 - Efeitos do nitrogênio amoniacal/amônia no reator anaeróbio

Nitrogênio amoniacal (NH₄⁺)/Amônia dissolvida (NH₃)	Efeito
50-200mg/L	Benéfico
200-1000mg/L	Sem efeitos adversos
1500-3000mg/L	Inibição em pH > 7

Fonte: Adaptado de Gerardi (2003)

2.3.4.3 *Oxigênio Dissolvido*

A presença de oxigênio dissolvido nos reatores anaeróbios pode se tornar um problema, especialmente em casos de projetos inadequados com intensa aeração do efluente antes da entrada no reator (PROSAB, 1999). A tolerância ao oxigênio pelas bactérias metanogênicas, por exemplo, pode variar de espécie para espécie, de acordo com as condições ambientais (Alves, 1998).

Segundo Alves (1998), efluentes pouco concentrados podem conter concentrações de até 10mg/L de oxigênio dissolvido. Esta característica tem capacidade de inibição das bactérias metanogênicas, provocando o crescimento de organismos aeróbios ou facultativos nos reatores anaeróbios.

2.3.4.4 *Metais Pesados*

Há uma grande variedade de metais pesados que podem ser encontrados em águas residuárias e que são levados até os reatores anaeróbios, como por exemplo o cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), níquel (Ni) e zinco (Zn). Baixas concentrações de alguns metais pesados, como cobalto, molibdênio e níquel, podem ser benéficos aos microrganismos do reator anaeróbio, servindo como aditivos ou ativadores que aumentam a atividade enzimáticas das bactérias formadoras de metano. No entanto,

altas concentrações de metais pesados podem causar toxicidade nos reatores anaeróbios (Gerardi, 2003).

Hickey et al. (1989) estudou o efeito dos metais pesados na produção de metano durante o processo de digestão anaeróbia, analisando especialmente o cobre, zinco e cádmio. Os resultados da pesquisa demonstraram a diferença do comportamento das populações bacterianas individualmente se em comparação com a resposta do consórcio microbiano como um todo.

A inibição da produção de metano devido à toxicidade de metais pesados não está relacionada somente com a inibição da metanogênese. Além das bactérias metanogênicas, outros grupos de bactérias presentes no consórcio da digestão anaeróbia podem ser severamente inibidos por conta da alta concentração de metais pesados (Hickey; Vanderwielen; Switzenbaum, 1989).

2.3.4.5 *Inibição de Feedback*

Além da toxicidade causada por substâncias vindas diretamente das águas residuárias, o processo de degradação anaeróbia gera subprodutos potencialmente tóxicos aos microrganismos presentes no meio. De acordo com Gerardi (2003), a fermentação resulta na produção de produtos intermediários, como o hidrogênio e os ácidos graxos voláteis, que em determinadas concentrações podem ser considerados tóxicos. A toxicidade causada por subprodutos da própria digestão anaeróbia é chamada de inibição de *feedback*.

A produção excessiva de hidrogênio causa aumento na pressão parcial de hidrogênio no reator, inibindo a atividade das bactérias formadoras de acetato. Já as altas concentrações de ácidos graxos voláteis afetam as bactérias formadores de metano por meio da toxicidade direta, ou indiretamente pela diminuição da alcalinidade e do pH (Gerardi, 2003).

2.3.4.6 *Adição de compostos químicos no tratamento de esgoto sanitário*

Eventualmente estações de tratamento de efluentes sanitários dispõem da adição de compostos químicos como alumínio, polialumínio e cloreto férrico em seus processos, visando a precipitação e remoção de fósforo, ou ainda com a intenção de

aumentar a eficiência de remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica (Ju et al., 2016; Vieira, 2017). No entanto, uma série de estudos sobre a presença de compostos químicos em tanques anaeróbios demonstram a alteração da composição do lodo biológico, além de uma possível inibição de dos microrganismos da digestão anaeróbia (Vieira, 2017).

De acordo com os estudos realizados por Jackson-Moss e Duncan (1991), as bactérias metanogênicas presentes em reatores UASB podem suportar concentrações de até 2500 mgAL³⁺/L, adicionado na forma de AlCl₃. Sendo assim, concentrações maiores causam inibição na produção de metano.

Vieira (2017) aborda em sua dissertação os resultados encontrados em diferentes estudos sobre a avaliação do alumínio na digestão anaeróbia, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Efeito do alumínio na digestão anaeróbia

Substrato	Reator	Dose Crítica	Efeitos	Ano de publicação
Lodos primário e biológico ¹	Bancada	1,5 g/L Al(OH) ₃	Inibição de 15% da produção de biogás	1973
Esgoto sintético ²	UASB	2,5 g/L AlCl ₃	Inibição de 76% na produção de metano	1991
Glicose ³	Semi-contínuo (1L)	1,0 g/L Al (OH) ₃	Inibição de 72% na produção de metano	2003
Lodos primário e biológico ⁴	Semi-contínuo (1,5L)	10,7 mg/gST Al ₂ SO ₄	Inibição completa da produção de metano	2015

¹ Hsu and Pipes (1973) apud Kim & Chung (2014); ² Jackson-Moss & Duncan (1991); ³ Cabirol et al. (2003); ⁴ Abbott & Eskicioglu (2015). Fonte: Vieira (2017)

A análise realizada por (Cabirol et al., 2003) afirma que concentrações de alumínio acima de 1000mg/L pode afetar a atividade das bactérias metanogênicas e acetogênicas. No entanto, as metanogênicas hidrogenofílicas possuem características de adaptabilidade ao alumínio, reduzindo o nível de inibição com o passar do tempo.

Ainda, Kim e Chung (2015), ao estudarem a inibição dos microrganismos da fermentação acidogênica pela adição de coagulantes, demonstraram que a aplicação destes compostos químicos pode afetar o processo de digestão anaeróbia. A utilização de policloreto de alumínio (PAC) em concentrações maiores que 46 mg/L, ou de cloreto férrico em concentrações maiores que 120 mg/L, como coagulante

inorgânico diminuiu a taxa de conversão de substratos orgânicos em ácidos graxos voláteis em 10% ou mais.

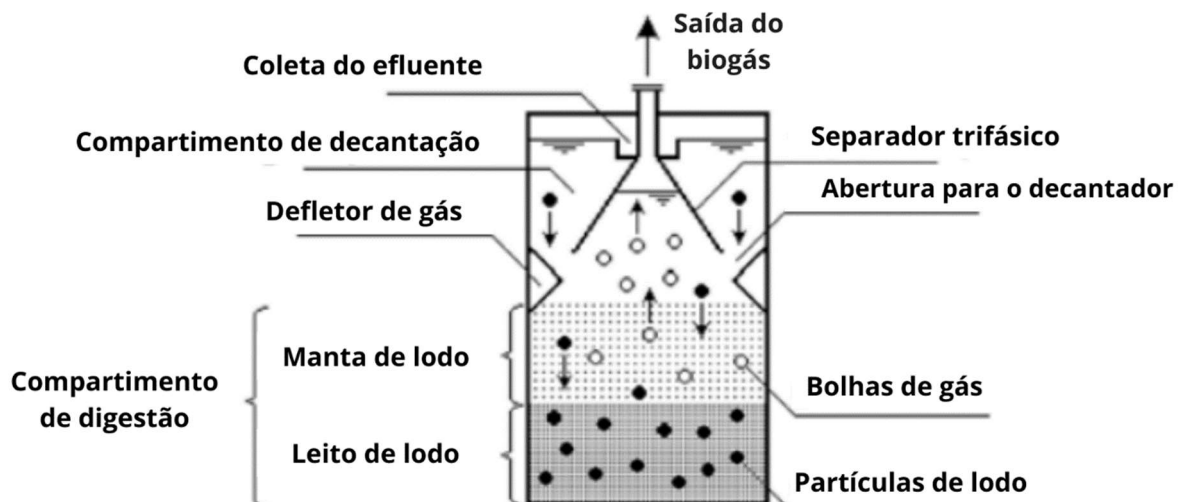
A diminuição de produção de ácidos graxos voláteis por conta da utilização de coagulantes está relacionada à diminuição da área de contato direto entre o substrato e as bactérias formadoras de ácido, tendo em conta o processo de coagulação (Kim; Chung, 2015).

Neste sentido, a inibição da atividade bacteriana no processo de degradação anaeróbia por conta da adição de compostos químicos, especialmente aqueles com a presença de alumínio, refletem a dificuldade de misturar lodo químicos com lodo biológico em reatores anaeróbios (Vieira, 2017).

2.4 REATOR ANAERÓBIO DE FLUXO ASCENDENTE (UASB)

O Reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) se trata de uma aplicação do processo de digestão anaeróbia para o tratamento de águas residuárias. Esse tipo de reator pode ser aplicado com diferentes configurações, no entanto suas partes fundamentais são o leito de lodo, a zona de sedimentação e o separador trifásico (PROSAB, 1999; Tunes, 2017).

Figura 2 - Representação esquemática do reator UASB



Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

O reator UASB possui um fluxo hidráulico ascendente, garantindo uma agitação e mistura adequada, proporcionando o contato entre a biomassa e a água residuária.

O processo de tratamento de esgoto em reatores UASB compreende como uma das suas etapas, a sedimentação dos sólidos suspensos. Esse processo ocorre por conta da densidade das partículas, bem como por conta do fluxo ascendente, deixando os sólidos retidos no manto de lodo (PROSAB, 1999).

Com o intuito de garantir o bom funcionamento do sistema, o reator UASB necessita de um separador trifásico em seu topo. Por via de regra, o lodo acaba sendo carregado para a parte superior do reator devido ao fluxo hidráulico e através das bolhas de gás. Dessa forma, o separador trifásico é essencial para a retenção do lodo, proporcionando seu retorno ao fundo do reator. Além disso, o separador trifásico funciona como separador de gás do líquido, direcionando o biogás para o topo do reator (Chernicharo, 2007; PROSAB, 1999).

De acordo com PROSAB (1999), o UASB além de proporcionar as reações para processamento da parte solúvel da matéria orgânica, ele também desempenha um papel de digestão da parte sólida retida. Isso significa que, o lodo gerado no processo pode ser considerado estável, necessitando somente de secagem após sua retirada do reator.

A Tabela 4 demonstra as vantagens e desvantagens do Reator UASB:

Vantagens	Desvantagens
Sistema compacto; Baixos custos de construção e operação; Baixa produção de lodo; Baixo consumo de energia; Remoção de DQO e DBO eficiente, entre 65% e 75%.	Possibilidade de geração de maus odores; Baixa tolerância à cargas tóxicas; Grande período de intervalo necessário para o <i>start-up</i> do sistema; Necessidade de pós-tratamento.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007)

O reator UASB não requer material suporte para os microrganismos, tendo em vista que a imobilização destes ocorre por auto-adesão, formando flocos ou grânulos densos suspensos, dispostos em camadas de lodo a partir do fundo do reator (Prampero, 2017). A configuração do UASB garante o desenvolvimento de grande quantidade de biomassa ativa, garantindo ao reator um elevado tempo de retenção celular e a capacidade de acomodação das altas cargas orgânicas volumétricas (PROSAB, 1999).

Durante a operação do UASB, alguns fatores importantes para a boa funcionalidade do reator são: tempo de detenção hidráulica (TDH), tempo de retenção celular, carga orgânica a ser tratada, produção de gases, relação entre matéria orgânica disponível no efluente e a biomassa presente no reator (Prampero, 2017).

2.5 ASPECTOS DO LODO ANAERÓBIO

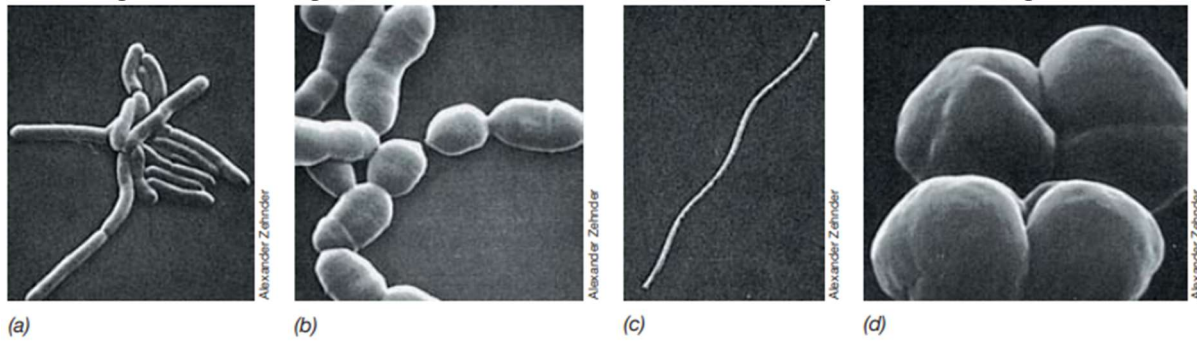
Os processos de tratamento de águas residuárias possuem como subproduto a geração de lodo na forma de suspensão de flocos. O lodo é considerado primário se gerado através da sedimentação de material particulado do afluente e, considerado secundário, se gerado no reator biológico. O lodo biológico é composto por diferentes componentes, como matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, microrganismos patogênicos, bem como da massa bacteriana que cresce no reator. Em reatores anaeróbios, a fração de massa bacteriana no lodo está na ordem de 2% a 20% (PROSAB, 1999; Sganzerla, 2013).

2.5.1 Microbiologia do lodo anaeróbio

O lodo anaeróbio é composto por uma vasta massa bacteriana, no presente estudo, o foco é especialmente as bactérias formadoras de metano. Segundo Gerardi (2003), as bactérias formadoras de metano possuem uma alta diversidade em termos de morfologia, podendo ser encontradas nas formas de bacilos individuais, bacilos curvos, espirais e cocos. Ainda, essas podem estar agrupadas como aglomerados irregulares das células, além de se apresentarem em cadeias de células ou filamentos.

A Figura 3 abaixo demonstra a morfologia de algumas bactérias metanogênicas observadas em microscopia eletrônica de varredura. Ainda, o Quadro 1 expõe a ordem/gênero das arqueias metanogênicas e suas respectivas morfologias.

Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura das arqueias metanogênicas



(a) *Methanobrevibacter ruminantium*. (b) *Methanobrevibacter arboriphilus*.
(c) *Methanospirillum hungatei*. (d) *Methanosarcina barkeri*.

Fonte: Madigan et al. (2016)

Quadro 1 - Morfologia de algumas arqueias metanogênicas

Ordem/gênero	Morfologia
<i>Methanobacterium</i>	Bacilos longos
<i>Methanobrevibacter</i>	Bacilos curtos
<i>Methanosphaera</i>	Cocos
<i>Methanothermus</i>	Bacilos
<i>Methanothermobacter</i>	Bacilos
<i>Methanococcus</i>	Cocos irregulares
<i>Methanothermococcus</i>	Cocos
<i>Methanocaldococcus</i>	Cocos
<i>Methanotorris</i>	Cocos
<i>Methanomicrobium</i>	Bacilos curtos
<i>Methanogenium</i>	Cocos irregulares
<i>Methanospirillum</i>	Espirilos
<i>Methanoplanus</i>	Células discoides achatadas – ocorrendo como discos finos com bordas agudas
<i>Methanocorpusculum</i>	Cocos irregulares
<i>Methanoculleus</i>	Cocos irregulares
<i>Methanofollis</i>	Cocos irregulares
<i>Methanolacinia</i>	Bacilos irregulares
<i>Methanosarcina</i>	Grandes cocos irregulares, em pacotes
<i>Methanolobus</i>	Cocos irregulares agregados
<i>Methanohalobium</i>	Cocos irregulares
<i>Methanococoides</i>	Cocos irregulares
<i>Methanohalophilus</i>	Cocos irregulares
<i>Methanosaeta</i>	De bacilos longos a filamentosos
<i>Methanosalsum</i>	Cocos irregulares
<i>Methanimicrococcus</i>	Cocos irregulares
<i>Methanopyrus</i>	Bacilos em cadeias

Fonte: Madigan et al. (2016)

2.6 CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

A digestão anaeróbia consiste na conversão de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples, que são solubilizadas formando uma mistura gasosa, denominada biogás (Melo, 2015). A composição do biogás está relacionada com as condições ambientais do reator, como pH e temperatura, além de ser influenciada pela natureza e composição do substrato (Chernicharo, 2007; Prati, 2010 apud Melo, 2015).

Reatores anaeróbios com operação estável apresentam biogás com composição uniforme. De acordo com Chernicharo (2007), a composição do biogás muda rapidamente durante a inicialização do sistema, bem como quando o processo de digestão anaeróbia está sofrendo inibição. A relação dióxido de carbono/metano varia de acordo com o composto orgânico a ser degradado, no entanto, as frações típicas de metano e dióxido de carbono gerados no tratamento anaeróbio são 70 a 80% e 20 a 30%, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os componentes normalmente presentes no biogás gerado em reatores anaeróbios.

Tabela 5 - Composição típica de biogás em reatores anaeróbios

Parâmetro	Unidade	Biogás de reatores anaeróbios
Metano – CH ₄	%	60 a 85
Gás carbônico – CO ₂	%	5 a 15
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	ppmv	1000 a 2000
Oxigênio – O ₂	%	traços

Fonte: Adaptado de Lobato (2011)

2.7 PRINCÍPIOS DA AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE METANOGENÉTICA ESPECÍFICA

A atividade metanogênica específica (AME) consiste na capacidade máxima de produção de metano por um consórcio de microrganismos anaeróbios. O teste AME ocorre em condições controladas de laboratório, proporcionando a atividade

bioquímica máxima de conversão de substratos orgânicos em biogás. Portanto, o AME funciona como um monitoramento da “eficiência” da população metanogênica do reator anaeróbio (Aquino et al., 2007).

Segundo Chernicharo (2007), o teste da Atividade Metanogênica Específica além de ser aplicado para quantificar a atividade metanogênica em lodos anaeróbios, este possui diversas outras aplicações, como:

- Avaliação do comportamento da biomassa sob o efeito de compostos possivelmente inibidores;
- Determinação da toxicidade de produtos químicos presentes em efluentes e resíduos sólidos;
- Estabelecer o grau de degradabilidade de diversos substratos;
- Monitorar mudanças na atividade do lodo, devido a um possível acúmulo de materiais inertes após longos períodos de operação do reator;
- Determinar a máxima carga orgânica que pode ser aplicada no reator;
- Avaliar parâmetros cinéticos.

A determinação da atividade metanogênica é avaliada através da medição direta da produção de metano por unidade de biomassa (SSV) e unidade de tempo. De acordo com Monteggia (1997), a aplicação do teste AME em lodo anaeróbio proveniente de reator biológico deve considerar os seguintes aspectos:

- Garantir um ambiente anaeróbio, com condições ambientais adequadas (temperatura e pH), além da presença de nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e elementos traço), para obtenção da atividade biológica máxima;
- Utilização de uma adequada população de microrganismos (SSV) e alimento suficiente (substrato) acima de concentrações limitantes, para que assim seja possível obter a taxa máxima de remoção de substrato;
- Utilização de equipamento de laboratório com capacidade de monitorar a produção de gás com previsão satisfatória durante o período do teste.

O teste AME não possui um procedimento padrão, as condições ambientais para o teste, bem como o tipo de substrato ou quantidade de biomassa, são parâmetros que diferem dependendo do autor. Essa falta de padronização dificulta a

comparação dos resultados obtidos nos trabalhos desse segmento (Aquino et al., 2007).

Em relação ao tipo de substrato, tendo em vista que aproximadamente 70% do metano gerado na degradação anaeróbia é oriundo da clivagem do acetato, alguns autores optam por utilizar sais de acetato ou ácido acético como substrato. Com a intenção de obter um excesso de alimento, indica-se concentrações de acetato entre 2,0g/L a 4,0g/L (Aquino et al., 2007; MONTEGGIA, 1997).

Ainda, há pesquisadores que utilizam como substrato uma mistura de Ácidos Graxos Voláteis (AGV), que são os ácidos orgânicos intermediários da digestão anaeróbia (ácido acético, propiônico e butírico). A utilização de AGV avalia não só a atividade metanogênica, mas sim a capacidade sintrófica do sistema, tendo em vista que as metanogênicas não produzem metano a partir de propionato ou butirato (Aquino et al., 2007). Nesses casos, Zeeuv (1984 apud Monteggia, 1997) indica a aplicação de uma concentração da mistura de 0,6g/L, resultando em uma DQO de 2,64g/L.

Com a intenção de avaliar todo o consórcio microbiano, há pesquisadores que optam pelo uso da glicose como substrato, a qual trata-se de um substrato mais complexo, podendo simular o que ocorre em um reator em escala real (Aquino et al., 2007). No entanto, a degradação da glicose ocorre de maneira mais rápida. Em ensaios de bancada em batelada desenvolvidos por Miqueleto (2003), demonstra-se que 2000mg/L de glicose podem ser degradadas em quatro horas pelos microrganismos.

Em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), indica-se concentrações de substrato entre 1,0 a 2,5gDQO/L (Chernicharo, 2007). Alguns autores utilizam a relação de Alimento/Microrganismo para definição da concentração de substrato e biomassa no teste AME. No entanto, Monteggia (1997) afirma que a concentração inicial de alimento é função das características biocinéticas das metanogênicas, não dependendo da quantidade de bactérias presentes. Portanto, o uso da relação A/M é inadequado para o planejamento do teste AME, podendo causar resultados contraditórios.

A quantidade de biomassa recomendada para realização do teste AME varia entre 2 a 5 gSSV/L (Monteggia, 1997). Chernicharo (2007) afirma que a concentração de Sólidos Suspensos Voláteis no teste AME normalmente está na ordem de 2,5gSSV/L.

Um fator importante para montagem do teste da Atividade Metanogênica Específica é a solução de nutrientes, também denominada água de diluição. Esta deve contar com macronutrientes, micronutrientes, alcalinidade e agente redutor. Contudo, não existe um consenso acerca da composição da solução de nutrientes (Aquino et al., 2007). Alguns dos reagentes encontrados na literatura para composição da água de diluição são:

- Macronutrientes: NH_4Cl , NaHCO_3 , KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , MgCl_2 , CaCl_2 , KCl , Na_2SO_4 , Na_2S , Extrato de Levedura;
- Micronutrientes: FeCl_3 , ZnCl_2 , CuCl_2 , MnCl_2 , $(\text{NH}_4)\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, AlCl_3 , CoCl_2 , NiCl_2 , H_3BO_3 , HCl .

A montagem do reator experimental para realização do teste AME consistirá na mistura de biomassa (lodo), substrato e solução de nutrientes. O volume final deve ocupar cerca de 70 a 90% do frasco reator, garantindo um *headspace* (Chernicharo, 2007). É importante que o frasco seja submetido a um fluxo de gás nitrogênio, reduzindo a concentração de oxigênio dissolvido (Sganzerla, 2013). Com relação às condições ambientais, há um consenso sobre a temperatura do teste, que deve estar entre 30 a 35°C, proporcionando condições de crescimento adequadas aos microrganismos metanogênicos mesofílicos (Aquino et al., 2007).

2.7.1 Medição do Biogás no Teste AME

A medição do biogás produzido durante o teste de Atividade Metanogênica Específica pode ser realizada de diferentes formas, com diferentes equipamentos, sendo classificados como métodos manométricos ou volumétricos.

2.7.1.1 Métodos manométricos

A aplicação do método manométrico para medição de biogás baseia-se na medição da pressão exercida sobre um sensor acoplado ao frasco de reação. Através da calibração do sistema, estabelece-se uma correlação entre a pressão medida e a quantidade de metano presente no frasco, permitindo determinar a taxa diária de produção de metano e, por fim, determinar o valor de AME (Aquino et al., 2007).

Os métodos manométricos possibilitam a automação do processo através da aplicação de medidores de pressão a microcomputadores. No entanto, essa modalidade de medição de biogás possui um custo elevado de aquisição e manutenção dos equipamentos (Aquino et al., 2007).

Ainda, outro sistema utilizado é o kit Oxitop, normalmente utilizado para determinação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). No equipamento em questão é possível medir acréscimos de pressão devido à produção de metano, tendo em vista que o gás carbônico também gerado é absorvido por de pastilhas de NaOH acopladas no equipamento (Aquino et al., 2007).

2.7.1.2 *Métodos volumétricos*

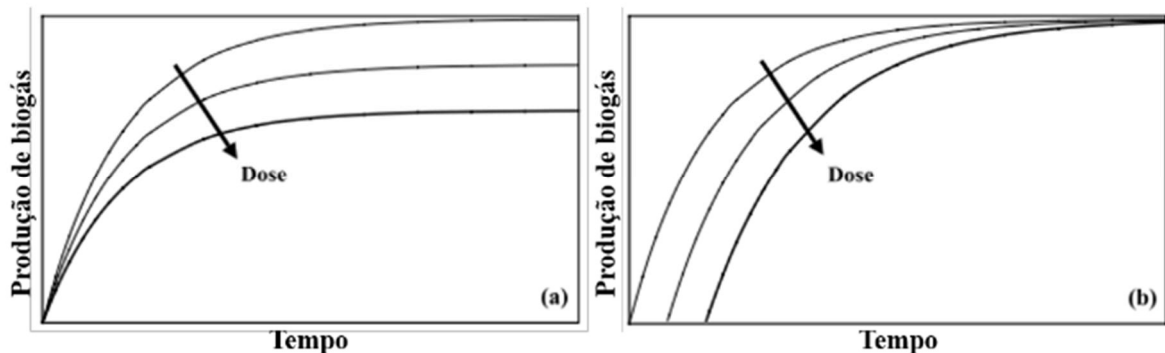
A avaliação do teste AME através do método volumétrico consiste na utilização de equipamentos capazes de medir o volume de metano, ou biogás, produzido no frasco reacional (Aquino et al., 2007). Os equipamentos podem variar, desde seringas esmerilhadas, ou então tubos eudiômetros. O monitoramento deve ocorrer diariamente, analisando o deslocamento da seringa, ou então do líquido do tubo eudiômetro, demonstrando assim o volume de biogás produzido.

Como o metano é um dos componentes do biogás, nesta modalidade pode-se aplicar a determinação da composição do biogás, a fim de avaliar o volume de metano produzido durante o teste AME. A análise da composição do gás pode ocorrer por cromatografia gasosa, ou através de equipamentos especializados na composição do biogás (Aquino et al., 2007; Proença, 2022).

2.8 AVALIAÇÃO DA INIBIÇÃO DA ATIVIDADE METANOGÊNICA

A inibição da atividade metanogênica pode ser definida com um efeito prejudicial que determinada substância causa nessa população microbiana, afetando alguma função particular de cada célula. Já a toxicidade consiste no efeito adverso em todo metabolismo celular (Speece, 1996 apud Vieira, 2017). Em processos de digestão anaeróbia, o efeito da inibição e toxicidade são apresentados nos seguintes padrões:

Figura 4 - Padrões típicos de inibição e toxicidade na digestão anaeróbia



Fonte: (VIEIRA, 2017)

- (a) Conforme a dose da substância estudada aumenta, o efeito da inibição também é aumentado. No entanto, a atividade relativa mantém-se constante em determinado tempo ao longo do teste. Essa situação denota a incapacidade do inóculo de se recuperar do efeito tóxico, não havendo efeito de aclimatação.
- (b) A inibição ocorre nas primeiras fases do teste, porém com o passar do tempo, a biomassa se adapta à presença da substância tóxica e recupera a atividade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição está localizada no município de Florianópolis/SC e, atualmente, é operada pela CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento). A ETE em questão possui capacidade de atendimento de 37.000 habitantes, com uma vazão média de projeto de 50l/s e máxima de 73L/s. De acordo com dados fornecidos pela CASAN, atualmente a entrada de esgoto bruto é em média 35l/s, com aumento nos períodos de temporada.

Acerca do efluente bruto que chega na estação, determina-se uma DBO média de 300-400mg/L, chegando à 500-600mg/L na temporada de verão. Já a DQO de entrada é em média 466mg/L.

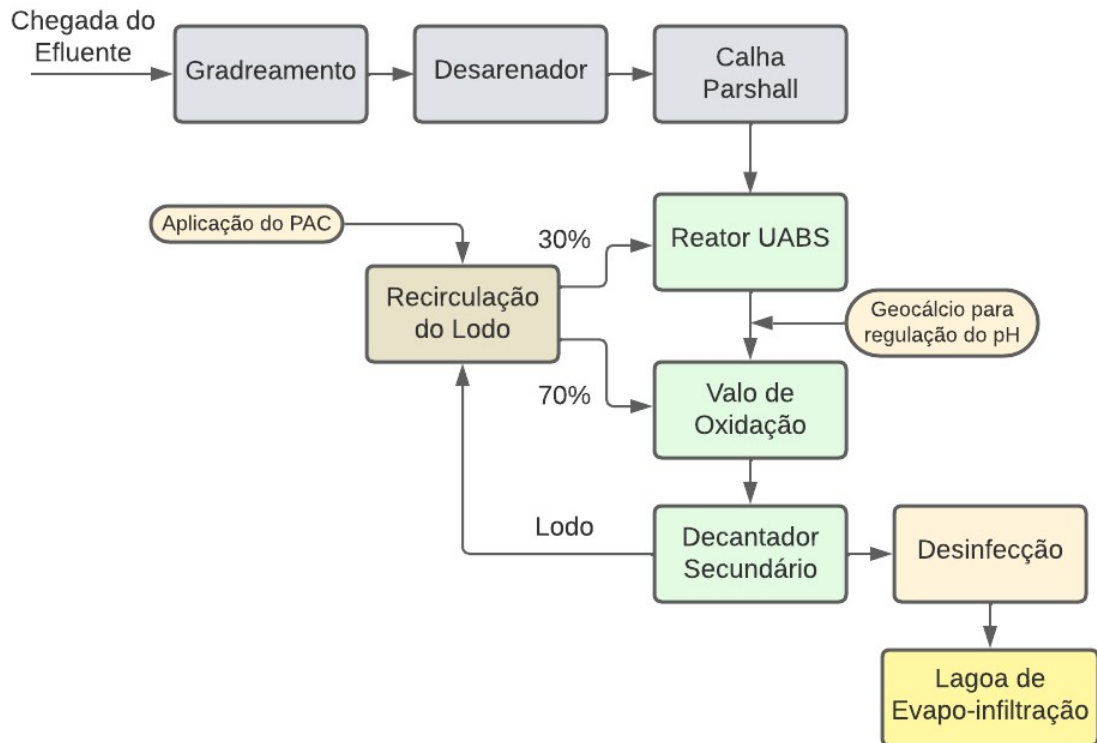
Figura 5 - Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição



Fonte: CASAN (2022)

O processo de tratamento de efluentes da ETE inicia-se com o tratamento preliminar, com a realização do gradeamento, seguido do desarenador e medição de vazão na Calha Parshall. O processo biológico de tratamento do efluente conta com as tecnologias de Reator UASB e Lodos Ativados em Valos de Oxidação. Além disso, o efluente passa por tratamento terciário, com aplicação de PAC (Policloreto de alumínio) para remoção do fósforo através da precipitação química. O PAC é adicionado no by-pass da recirculação do lodo, conforme demonstrado na Figura 6. Após o valo de oxidação, o efluente passa pelo decantador secundário, onde o lodo é separado da fase líquida. Enfim, o efluente passa por um processo de desinfecção. O efluente final é lançado em uma lagoa de evapo-infiltração.

Figura 6 - Processo de tratamento de efluentes – ETE Lagoa da Conceição



Fonte: Própria autora (2023)

No presente trabalho, foram coletadas amostras do lodo do Reator UASB da ETE citada. O reator em questão possui um volume de 1620m³ e uma concentração de sólidos totais de 15.000mg/L, conforme informado pelo setor de operação da ETE.

As análises laboratoriais referentes a esse estudo foram realizadas no LABEFLU (Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.2 COLETA E ARMAZENAMENTO DO INÓCULO

O inóculo foi coletado diretamente da saída de amostragem do lodo do Reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição, optando pela saída com lodo visualmente mais adensado. Para a realização do teste foram coletadas amostras em dois dias diferentes sendo nos dias 10/08/2023 e 26/09/2023. O lodo foi armazenado em temperatura ambiente até o seu uso.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO

3.3.1 Série de Sólidos

A caracterização do teor de sólidos consistiu na análise de Sólidos Totais, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Totais Fixos, Sólidos em Suspensão Totais, Sólidos em Suspensão Voláteis, Sólidos em Suspensão Fixos, Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos Dissolvidos Voláteis e Sólidos Dissolvidos Fixos. As análises foram realizadas conforme *Standard Methodes for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

3.3.1.1 Sólidos Totais

Para a análise de sólidos totais foram utilizados 50mL de amostra do inóculo, a qual foi levada à estufa a uma temperatura entre 103°C e 105°C, por um período de 24 horas.

$$ST = ((P2 - P1) * 1000) / V \quad (5)$$

Sendo:

ST – Concentração de Sólidos Totais (mg/L)

P2 – Peso do cadinho após 24 horas na estufa (g)

P1 – Peso inicial do cadinho (g)

V – Volume de amostra (L)

3.3.1.2 Sólidos Voláteis Totais

Para a análise de sólidos voláteis aqueceu-se o cadinho do item anterior (3.1.1.1) na mufla por um período de 1 hora.

$$STV = ((P2 - P3) * 1000) / V \quad (6)$$

Sendo:

STV – Concentração de Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

P2 – Peso do cadinho após 24 horas na estufa (g)

P3 – Peso do cadinho após 1 hora na mufla (g)

V – Volume de amostra (L)

3.3.1.3 *Sólidos Totais Fixos*

Os Sólidos Totais fixos foram calculados através da Equação 7.

$$STF = ST - STV \quad (7)$$

Sendo:

STF – Concentração de Sólidos Totais Fixos (mg/L)

ST – Concentração de Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

STV – Concentração de Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

3.3.1.4 *Sólidos em Suspensão Totais*

Para a análise de sólidos em suspensão totais a amostra foi filtrada com auxílio de um funil à vácuo e papel filtro. As amostras variaram entre 20mL e 10mL, dependendo da sua densidade. Depositou-se o material filtrado em um cadinho e realizou-se o mesmo procedimento de Sólidos Totais (3.1.1.1).

$$SST = ((P2 - P1) * 1000) / V \quad (8)$$

Sendo:

SST – Concentração de Sólidos em Suspensão Totais (mg/L)

P2 – Peso do cadinho mais resíduo filtrado após 24 horas na estufa (g)

P1 – Peso inicial do cadinho somado ao peso do papel filtro (g)

V – Volume de amostra (L)

3.3.1.5 *Sólidos em Suspensão Voláteis*

Para a análise de sólidos voláteis aqueceu-se o cadinho do item anterior (3.1.1.4) na mufla por um período de 1 hora.

$$SSV = ((P2 - P3) \cdot 1000) / V \quad (9)$$

Sendo:

SSV – Concentração de Sólidos em Suspensão Voláteis (mg/L)

P2 – Peso do cadinho mais resíduo filtrado após 24 horas na estufa (g)

P3 – Peso do cadinho após 1 hora na mufla (g)

V – Volume de amostra (L)

3.3.1.6 *Sólidos em Suspensão Fixos*

Os Sólidos em Suspensão fixos foram calculados através da Equação 10.

$$STF = ST - STV \quad (10)$$

Sendo:

STF – Concentração de Sólidos Totais Fixos (mg/L)

ST – Concentração de Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

STV – Concentração de Sólidos Voláteis Totais (mg/L)

3.3.1.7 *Sólidos Dissolvidos*

Os Sólidos Dissolvidos Totais, Sólidos Dissolvidos Voláteis e Sólidos Dissolvidos Fixos foram calculados através da diferença dos testes previamente realizados.

$$SDT = ST - SST \quad (11)$$

$$SDV = STV - SSV \quad (12)$$

$$SDF = STF - SSF \quad (13)$$

Sendo:

SDT – Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)

SDV – Concentração de Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)

SDF – Concentração de Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)

3.3.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise da Demanda Química de Oxigênio foi realizada pelo método Colorimétrico, conforme *Standard Methodes for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Utilizou-se tubos de ensaio de borossilicato, nos quais foram adicionados 1,5mL do Reagente 1 ($K_2Cr_2O_7$), 3,5mL do Reagente 2 ($H_2SO_4+Ag_2SO_4$) e 2,5mL da amostra. A amostra de inóculo foi diluída na proporção de 1:20, em água destilada. O teste foi realizado em triplicada.

Após a homogeneização dos tubos de ensaio, estes foram aquecidos em bloco digestor por 120 minutos, à uma temperatura de 150°C. Ao finalizar o aquecimento, os tubos foram resfriados lentamente no bloco digestor para posterior leitura em espectrofotômetro UV-Vis, obtendo o resultado da DQO.

3.4 TESTE DA ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA

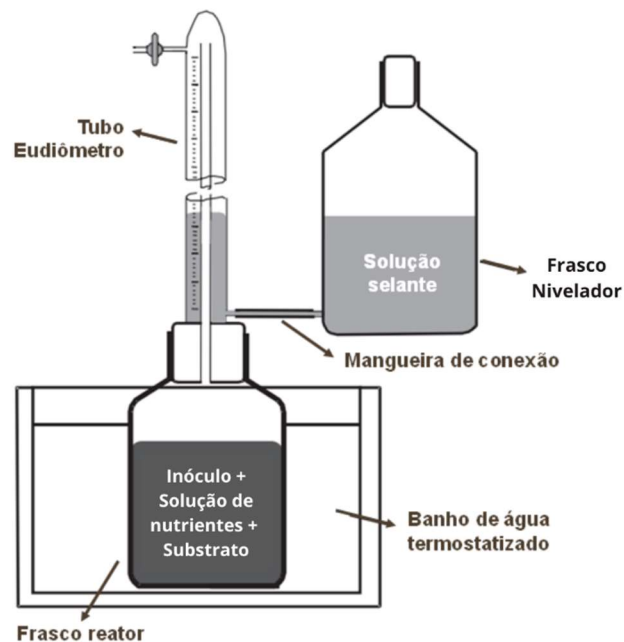
No presente trabalho aplicou-se o Teste de Atividade Metanogênica específica no lodo oriundo da Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição. Para determinação dos resultados, o teste AME foi realizado quatro vezes, buscando analisar diferentes condições experimentares.

3.4.1 Sistema de Medição do Biogás

O teste da Atividade Metanogênica Específica consiste na quantificação de biogás, especialmente do gás metano, gerado durante o processo de degradação anaeróbia. No trabalho em questão utilizou-se o método volumétrico para medição do biogás, determinando então o volume de metano produzido no frasco reacional com o lodo objeto do estudo.

Para a determinação de volume fez-se o uso dos Tubos Eudiômetros, que possui como princípio de funcionamento o deslocamento de uma solução selante para medição do volume de gás produzido durante o teste. O sistema é composto por um frasco reator conectado ao tubo eudiômetro, que por sua vez é conectado por uma mangueira à um frasco contendo solução selante (Figura 7). A válvula superior do tubo é aberta, bem como o frasco nivelador, equilibrando o nível de ambos. Assim, verifica-se o nível inicial de leitura, após isso a válvula superior é fechada, para que não haja escape do biogás gerado.

Figura 7 - Sistema de Tubos Eudiômetros



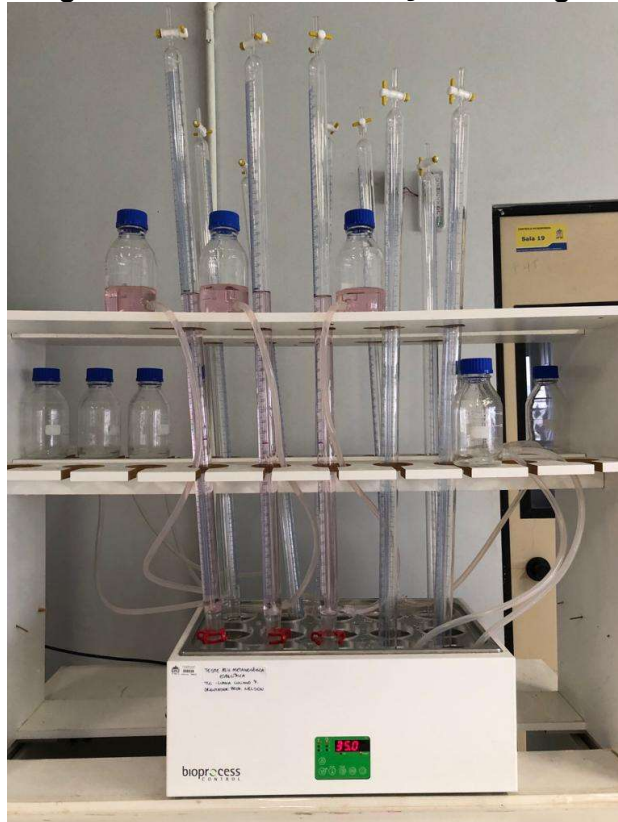
Fonte: Adaptado de Neitzel (2015)

A solução selante trata-se de uma solução ácida inerte aos gases constituintes do biogás, evitando o escape destes para fora do sistema. Esta solução é composta de água destilada, ácido sulfúrico, sulfato de sódio, além de algumas gotas de solução vermelho de metila para garantir a coloração rosada, que auxilia na visualização do nível dentro do tubo eudiômetro.

Como demonstrado na Figura 8, o sistema dispõe de banho de água termostatizado, mantendo a temperatura indicada para o teste AME, entre 30°C e 35°C.

Após a montagem do sistema e início do teste, o biogás gerado no frasco reator percorre o interior do tubo eudiômetro encontrando saídas para lateral do tubo na parte superior. Com isso, o biogás causa deslocamento da solução selante, permitindo a verificação de volume de biogás gerado.

Figura 8 - Sistema de Medição do Biogás



Fonte: Própria autora (2023)

O acompanhamento do Teste AME ocorreu diariamente, sendo realizado a leitura do volume deslocado nos tubos eudiômetros. A leitura do biogás foi realizada igualando o nível do menisco da solução selante do frasco nivelador com o do tubo eudiômetro, para que desta forma a influência da pressão atmosférica do dia seja corrigida. No momento da leitura, foram verificados os seguintes parâmetros:

- Data da leitura;
- Horário;
- Pressão atmosférica no momento da leitura, sendo consultado por aplicativo no *smartphone*;
- Temperatura ambiente no momento da leitura;
- Temperatura do banho termostatizado;

- Volume de gás nos tubos eudiômetros.

Os dados coletados foram aplicados na Equação 14, com o objetivo de eliminar os erros sistemáticos na quantificação do biogás produzido.

$$V_N = \frac{(P-P_V).T_N.V}{P_N.T} \quad (14)$$

Onde:

V_N – Volume do gás em condições normais (mL)

V – Volume do gás medido no tubo eudiômetro (mL)

P – Pressão atmosférica no momento da leitura (mbar)

P_V – Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (mbar)

T_N – Temperatura normal (273K)

P_N – Pressão normal (1013mbar)

T – Temperatura ambiente no momento da leitura (K)

3.4.2 Montagem dos experimentos

3.4.2.1 Substrato

Para realização do Teste da Atividade Metanogênica Específica utilizou-se diferentes substratos, com o objetivo de compreender o comportamento do inóculo com cada um destes. Inicialmente, no Teste 1, testou-se a aplicação da mistura de ácidos graxos voláteis, contendo ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico. Cada um dos ácidos foi utilizado na concentração de 0,6g/L, resultando em uma DQO Teórica de 2,64gDQO/L.

No Teste 2, além da aplicação da mistura de ácidos graxos voláteis, optou-se por utilizar a glicose como substrato, sendo utilizados em reatores distintos. A glicose foi adicionada na concentração de 2g/L, resultando em uma DQO Teórica de 2,13 gDQO/L. Já no terceiro e quarto teste, optou-se por permanecer com a aplicação da glicose, além da utilização de Acetato de Sódio em reator distinto. O Acetato de Sódio foi adicionado na concentração de 2g/L, resultando em uma DQO Teórica de 2,14gDQO/L. A concentração de substrato em cada teste está descrita no Quadro 4.

3.4.2.2 Solução de Nutrientes

Foi adicionado nos reatores uma solução de macro e micronutrientes. No Teste 1 a solução de nutrientes baseou-se na referência de Souza et al. (2005) apud Aquino et al. (2007), conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Solução de Nutrientes no Teste 1

Nutriente	Concentração (mg/L)
	Teste 1
NH ₄ Cl	500
NaHCO ₃	1000
KH ₂ PO ₄	650
MgCl ₂ .6H ₂ O	100
CaCl ₂ .2H ₂ O	100
ZnCl ₂	0,05
CuCl ₂ .2H ₂ O	0,03
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0,05
CoCl ₂ .6H ₂ O	2
H ₃ BO ₃	0,01
HCl concentrado	1 mL/L
Extrato de Levedura	200

Fonte: Souza et al. (2005) apud Aquino et al. (2007)

Nos testes seguintes, optou-se por seguir a solução de nutrientes proposta por Chernicharo (2007), conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Solução de Nutrientes Testes 2, 3 e 4

	Nutriente	Concentração (mg/L)		
		Teste 2	Teste 3	Teste 4
Solução 1	NH ₄ Cl	500	500	500
	KH ₂ PO ₄	1500	1500	1500
	K ₂ HPO ₄	1500	1500	1500
	Na ₂ SO ₄	-	-	9
	Extrato de Levedura	200	200	200
Solução 2*	FeCl ₂ .4H ₂ O	-	2000	2000
	ZnCl ₂	50	50	50
	CuCl ₂ .2H ₂ O	24,8	24,8	24,8

	Nutriente	Concentração (mg/L)		
		Teste 2	Teste 3	Teste 4
	MnCl ₂ .4H ₂ O	-	610,1	610,1
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	50	50	50
	AlCl ₃ .6H ₂ O	-	90	90
	CoCl ₂ .6H ₂ O	-	2000	2000
	HCl concentrado	1mL/L	1mL/L	1mL/L

*Foi adicionada 1mL da Solução 2 em um litro da Solução 1

Fonte: Chernicharo (2007)

3.4.2.3 Concentração de Inóculo

O inóculo coletado do Reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição foi adicionado nos reatores em uma concentração de 2,5gSSV/L, com base em sua caracterização de teor de sólidos, levando em consideração a faixa entre 2 – 5 gSSV/L indicada por Monteggia (1997). O volume de inóculo em cada reator foi definido com base na Equação 15.

$$C1.V1=C2.V2 \quad (15)$$

Onde:

C1 – Concentração de SSV do lodo (g/L)

V1 – Volume de inóculo a ser adicionado no frasco reator (L)

C2 – Concentração de SSV no frasco reator (2,5gSSV/L)

V2 – Volume útil do frasco reator (0,2L)

3.4.2.4 Condições experimentais

O teste AME foi conduzido em triplicada, com o intuito de aumentar a confiabilidade da análise. Os ensaios foram realizados sem agitação, com temperatura controlada em 30°C, com exceção do Teste 1, que foi aplicado com temperatura de 35°C. Foi realizada a averiguação do pH antes no início dos testes, mantendo-os na ordem de 6,7 até 7,7, com exceção do Teste 1, no qual não foi realizado tal controle. Com o objetivo de diminuir a presença de oxigênio no sistema,

foi realizada a purga com nitrogênio gasoso, sendo que essa condição também foi aplicada a partir do Teste 2.

Os reatores foram montados considerando um *headspace* de 20% nos frascos reatores com volume útil de 200mL. Sendo assim, os frascos reatores eram preenchidos com as quantidades calculadas de inóculo e substrato, completando o frasco com solução de nutrientes até alcançar o volume útil. O Quadro 4 resume as condições de montagem dos reatores em cada um dos testes.

Quadro 4 - Resumo das condições de montagem dos reatores

	Sólidos em Suspensão Voláteis (g/L)	Concentração inóculo (gSSV/L)	Volume de inóculo (mL)	Concentração de substrato (g/L)			Relação gDQO/gSSV		
				Mistura de AGV*	Glicose	Acetato de Sódio	Mistura de AGV	Glicose	Acetato de Sódio
Teste 1	10,917	2,5	45,8	0,6	-	-	1,056	-	-
Teste 2	10,917	2,5	45,8	0,6	2,0	-	1,056	0,852	-
Teste 3	10,917	2,5	45,8	-	2,0	2,0	-	0,852	0,856
Teste 4	8,371	2,5	59,7	-	2,0	2,0	-	0,852	0,856

*A mistura de AGV utiliza 0,6g/L de cada um dos ácidos (acético, propiônico e butírico)

3.4.3 Avaliação da Inibição da Atividade Metanogênica pelo Uso do PAC

Com o objetivo de compreender o comportamento da biomassa com a adição de Policloreto de Alumínio, realizou-se um Teste de Atividade Metanogênica Específica com diferentes dosagens de PAC. Além da utilização do inóculo coletado na ETE da Lagoa na Conceição, utilizou-se em paralelo um lodo de esterco bovino, disponibilizado pelo laboratório e-biotech do Departamento de Engenharia Química e de Alimentos da UFSC.

Vale ressaltar que a ETE da Lagoa da Conceição já faz uso do PAC no seu processo de tratamento, portanto o inóculo lá coletado não está livre de concentrações de PAC. Nesse sentido, a utilização do lodo de esterco bovino auxilia na comparação de resultados e confirmação da inibição ou não através do PAC.

O sistema de medição de biogás utilizado também foi através dos tubos eudiômetros, além disso os frascos reatores foram submetidos à mesma solução de nutrientes, temperatura do teste em 30°C e pH na ordem de 6,8 e 7,1. Como substrato, optou-se pela utilização de Acetato de Sódio, na concentração de 2g/L. Para a

avaliação da inibição, foram utilizadas 3 diferentes dosagens de PAC, tanto no inóculo da ETE da Lagoa, quanto no lodo de esterco bovino.

A primeira concentração foi calculada levando em consideração a dosagem aplicada na ETE diretamente no valo de oxidação, sendo 0,083mL/L. Considerando uma densidade de 1,3g/mL para o PAC, calcula-se que a concentração é aproximadamente 108mg/L. A segunda concentração aplicada foi de 0,5mL/L ou 650mg/L. Já a terceira concentração é extremamente maior que as outras, com a intenção de verificar a inibição por acúmulo de PAC na manta de lodo do reator UASB. Sendo assim, foi aplicada uma concentração de 20mL/L, ou em termos de massa, 26000mg/L.

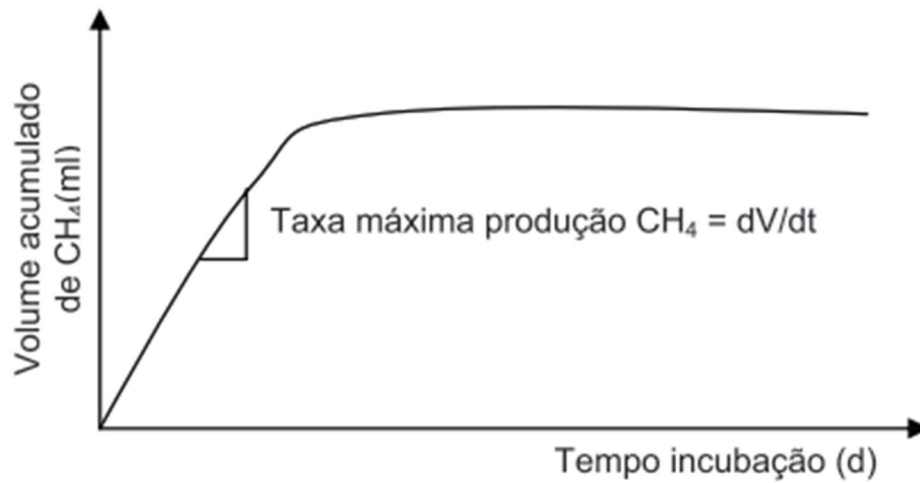
Quadro 5 - Resumo das condições de montagem dos reatores

	Sólidos em Suspensão Voláteis (g/L)	Concentração inóculo (gSSV/L)	Volume de inóculo (mL)	Concentração de acetato (g/L)	Concentração de PAC (mg/L)		
					Conc. 1	Conc. 2	Conc. 3
Lodo da ETE	8,375	2,8	67,0	2,0	108	650	26000
Lodo Bovino	67,430	2,5	7,4	2,0	108	650	26000

3.4.4 Cálculos da Atividade Metanogênica Específica

Normalmente o resultado do teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) é expresso em termos de mLCH₄/gSSV.d ou gDQO_{CH₄}/gSSV.d. Para obtenção deste resultado, foram analisados os gráficos de volume de metano versus tempo de incubação.

Figura 9 - Análise gráfica da taxa máxima de produção de metano



Fonte: (Aquino et al. (2007))

A taxa dV/dt foi obtida graficamente através da ferramenta Excel, por meio de linhas de tendência dos intervalos com maior inclinação da reta. Portanto, foi utilizada a Equação 16 para obtenção do resultado do teste AME em termos de $mLCH_4/gSSV.d$.

$$AME \left(\frac{mLCH_4}{gSSV.d} \right) = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{24h}{1d} \cdot \frac{1}{gSSV} \quad (16)$$

Ainda, para apresentação do resultado em termos de DQO, partiu-se do princípio que 1 mol de metano equivale à 64g de DQO. Além disso, sabe-se que na CNTP (0°C e 1atm), qualquer gás ocupa um volume de 22,7L (Aquino et al., 2007). Então, utilizou-se a Equação 17 com os valores de CNTP e os utilizados no teste em laboratório:

$$\begin{aligned} \left(\frac{P1.V1}{T1} \right)_{CNTP} &= \left(\frac{P2.V2}{T2} \right)_{LAB} \\ \left(\frac{1atm.22,7L}{273K} \right)_{CNTP} &= \left(\frac{1at .V2}{303K} \right)_{LAB} \end{aligned} \quad (17)$$

$$V2 = 25,19L$$

Dessa forma, 1 mol de metano ocupa um volume de 25,19L nas condições experimentais do presente estudo e, 394mL de metano produzido equivalem a 1g de

DQO degradada. Através dessa relação, pode-se expressar o resultado do teste AME em termos de $gDQO_{CH_4}/gSSV.d$ (Aquino et al., 2007).

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DO BIOGÁS

Para analisar o biogás qualitativamente utilizou-se o analisador de gases portátil da marca LANDTEC do modelo BIOGAS5000. O equipamento coleta amostra do biogás através de uma bomba interna e uma mangueira, demonstrando em seu visor a composição do biogás em termos de porcentagem de gás metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico (H_2S). Para caracterização do biogás gerado no teste AME, a mangueira é conectada na saída do tubo eudiômetro.

3.6 MICROSCOPIA DO LODO ANAERÓBIO

O inóculo submetido ao teste de atividade metanogênica específica foi observado em microscópio com o intuito de identificar a morfologia dos microrganismos presentes. A análise por microscópio foi realizada com as duas amostras coletadas de lodo do reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição. Portanto, a microscopia óptica binocular foi aplicada com o microscópio Olympus modelo BX-41.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO INÓCULO

Os valores encontrados para o teor de sólidos e DQO do lodo do Reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de Sólidos do Inóculo

CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (mg/L)		
	Amostra 1	Amostra 2
ST	16854,00	13672,00
STV	11275,33	9375,33
STF	5578,67	4296,67

CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (mg/L)		
	Amostra 1	Amostra 2
SST	16211,67	12210,00
SSV	10916,67	8375,00
SSF	5295,00	3835,00
SDT	642,33	1462,00
SDV	358,67	1000,33
SDF	283,67	461,67
DQO	15345,67	17478,50

Fonte: Própria autora (2023)

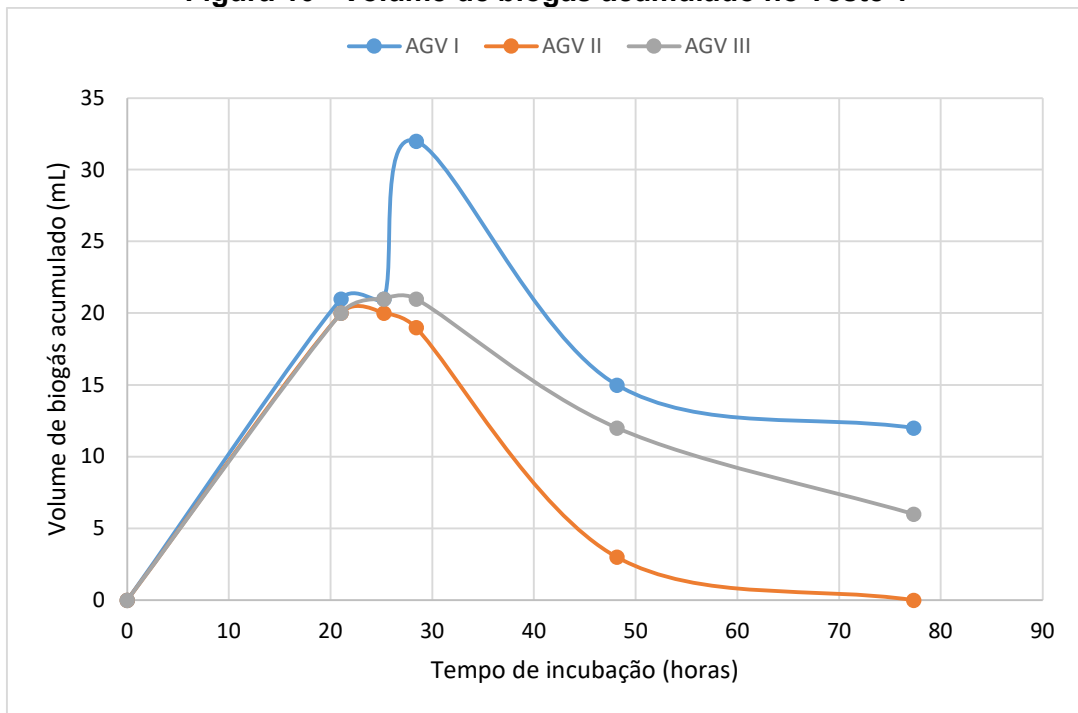
Sganzerla (2013) encontrou valores próximos aos demonstrados no presente estudo, também fazendo uso do lodo do reator UASB na ETE da Lagoa da Conceição. No estudo em questão, o lodo foi caracterizado com 10,9 SSV/L e 17787,5 mgDQO/L. Além disso, o setor de operação da ETE informou que as análises de Sólidos Totais no reator estão na ordem de 15000mg/L. Esse fator demonstra uma consistência dos dados, bem como atesta uma estabilidade da composição do efluente que chega no reator UASB e no lodo formado neste.

De acordo com Metcalf & Eddy (2016), a camada superior do manto de lodo de um reator UASB apresenta uma concentração de sólidos totais na faixa de 10 a 30 g/L. Dessa forma, o lodo coletado para o presente estudo apresenta um teor de sólidos dentro do esperado para um reator UASB.

4.2 CALIBRAÇÃO DO MÉTODO TESTE AME

Os testes preliminares (1 e 2) foram realizados com o objetivo de compreender qual o melhor substrato e condições experimentares para realização do Teste AME, gerando ajustes importantes para os testes posteriores. O teste 1 foi aplicado com a adição de mistura de Ácidos Graxos Voláteis como substrato e obteve uma duração de aproximadamente 77 horas. O resultado de volume de biogás acumulado por tempo do teste está demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Volume de biogás acumulado no Teste 1



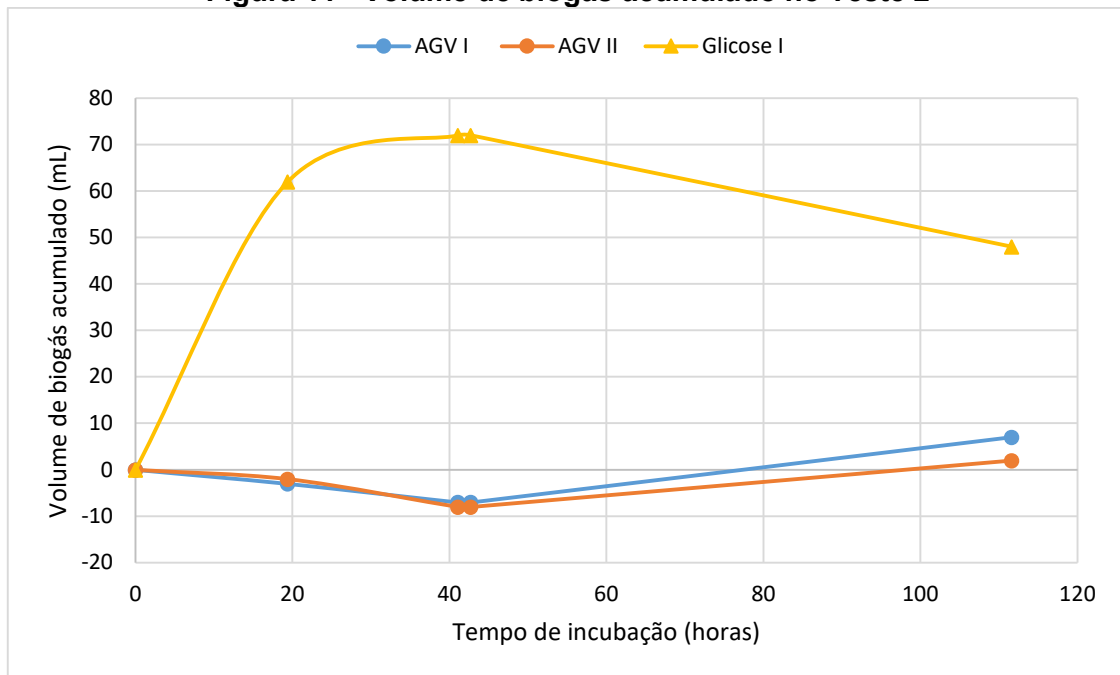
Fonte: Própria autora (2023)

Observa-se que entre o $t=0h$ e $t=21h$ os reatores apresentaram uma geração de biogás crescente, e a partir desse momento o comportamento dos reatores sofreram uma diferenciação. O Reator 1 apresentou um pico de crescimento do $t=21h$ até $t=28h$, já os demais reatores apresentam um decréscimo. Ressalta-se que o teste 1 não teve controle de pH inicialmente, bem como não contou com a purga com nitrogênio, podendo ter influenciado no resultado do teste.

O teste foi encerrado ao $t=77h$ tendo em vista a estabilização na geração de biogás, bem como a característica de possível consumo do biogás gerado. O pico de biogás acumulado foi de 32mL (Reator I), 20mL (Reator II) e 21mL (Reator III).

O segundo teste foi aplicado com dois diferentes substratos. Os Reatores AGV I e AGV II são referentes ao substrato de mistura de ácidos graxos voláteis, sendo o reator restante com utilização da glicose. O teste 2 obteve uma duração de aproximadamente 112 horas (Figura 11).

Figura 11 - Volume de biogás acumulado no Teste 2



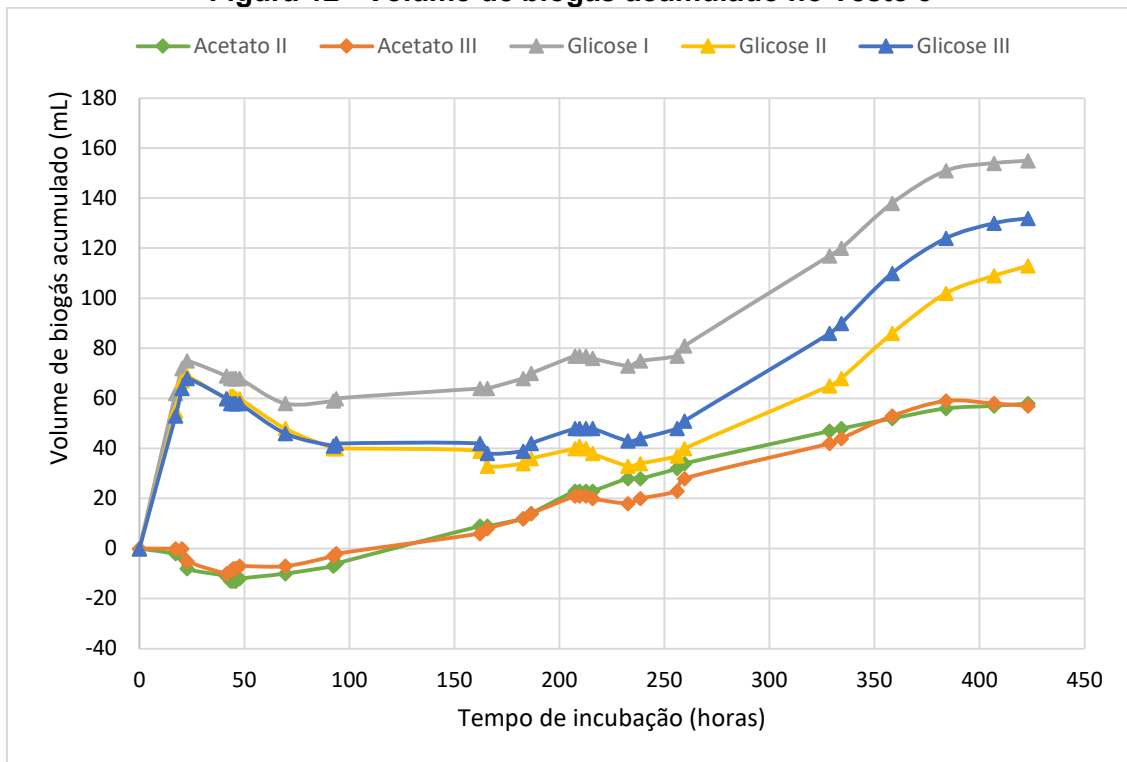
Fonte: Própria autora (2023)

Nesse teste em questão foi ajustado o pH das amostras em torno de 6,7, porém os reatores com mistura de AGV não demonstraram geração de biogás considerável. Comparando com o Teste 1, o comportamento do sistema com AGV mostrou-se bastante distinto. Para os reatores com mistura de AGV, a média de volume de biogás gerado foi de 4,5mL. Por conta da instabilidade do sistema com o uso deste substrato, além da baixa geração de biogás, optou-se por não o utilizar dos testes seguintes.

Já o reator Glicose I, foi aplicado com o objetivo de testar o uso da glicose como substrato. Nesse caso do t=0h até t=19h houve uma fase de geração de biogás acelerada. De t=19h até t=43h a geração diminuiu a velocidade, sendo que após esse período o volume de biogás apresentou um cenário de decréscimo. O pico de biogás gerado ocorreu no t=41h com uma geração de 72mL.

O terceiro teste foi aplicado em triplicada com cada substrato, realizando as devidas correções de pH e aplicação de nitrogênio gasoso antes do início do teste. O reator Acetato I apresentou falha na medição após o t=48h, por este motivo foi descartado da análise.

Figura 12 - Volume de biogás acumulado no Teste 3



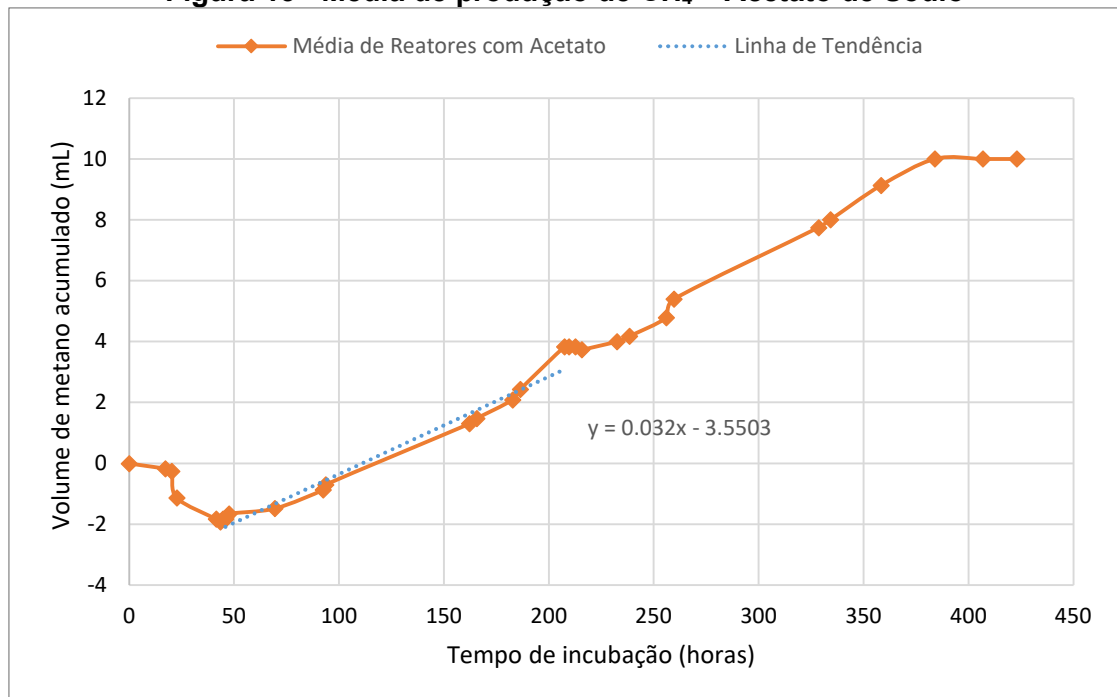
Fonte: Própria autora (2023)

Observando os reatores que utilizaram Acetato de Sódio como substrato, nota-se um *start-up* mais lento em comparação com os reatores com glicose. A produção de biogás teve início a partir no $t=48h$, ou seja, 2 dias após o início do teste. No entanto, após o início a geração de biogás se apresentou constante, chegando no seu pico em $t=384h$, sendo 16 dias após o *start-up* do sistema, totalizando um volume de biogás de 59mL. Após esse período, o volume de metano se mostrou estável, justificando o encerramento da simulação em $t=423h$.

O teste em questão foi realizado com a concentração de 2g/L de Acetato de Sódio, resultando na DQO teórica de 2,14DQO/L. Tendo como base a Equação 2, a DQO adicionada ao reator proporcionaria um volume de metano de aproximadamente 166mL.

A Figura 13 representa a média de volume de metano produzido nos reatores Acetato II e III, considerando a composição do biogás apresentada no item 4.5. Destaca-se em azul a linha de tendência do intervalo com maior inclinação de reta, consequentemente, o intervalo de maior taxa de produção de CH_4 .

Figura 13 - Média de produção de CH₄ – Acetato de Sódio



Fonte: Própria autora (2023)

Com base no intervalo de maior produção de metano, obteve-se uma velocidade de produção máxima de 0,77mLCH₄/d, com isso a atividade metanogênica específica do lodo foi calculada em 1,54 mLCH₄/gSSV.d ou 0,004gDQO_{CH₄}/gSSV.d. O volume acumulado de metano foi de 10mL em 17 dias (423 horas).

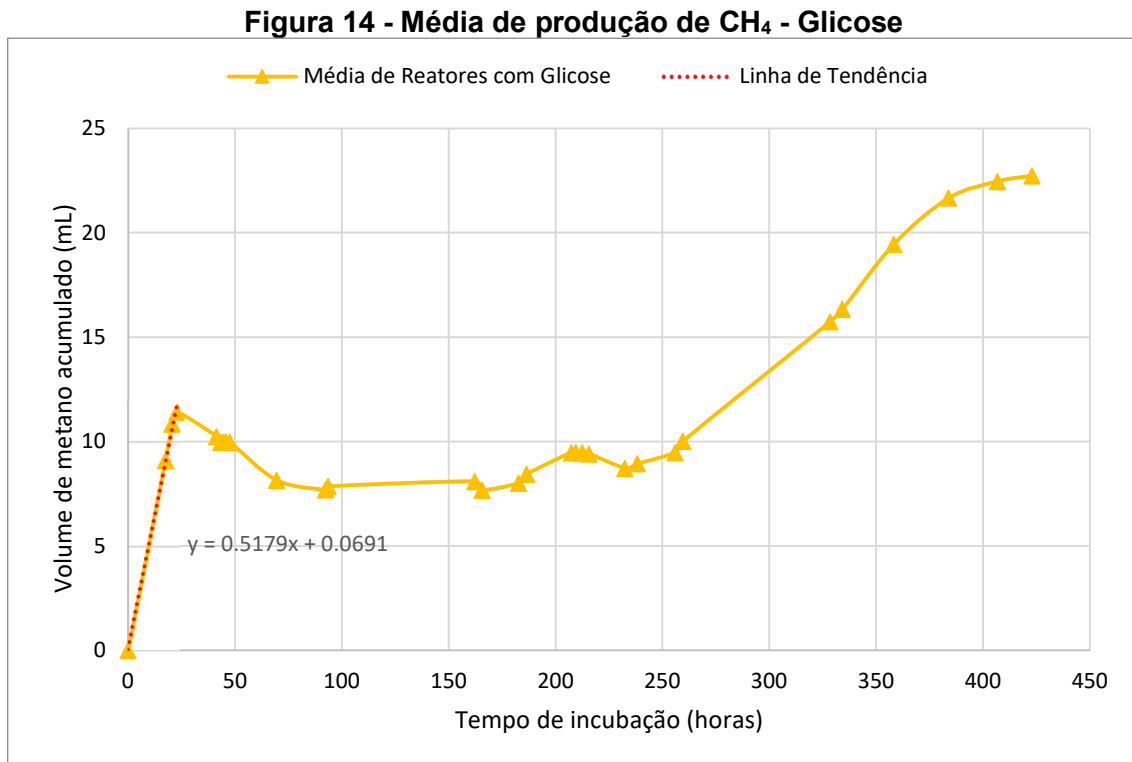
Retornando à análise da Figura 12, nota-se que os reatores Glicose I, II e III, apresentam um comportamento distinto dos reatores com acetato. Desde o *start-up* do sistema até t=23h, a produção de biogás apresenta alta velocidade, demonstrando um rápido consumo do substrato. Após este período, a produção de biogás se torna estável, apresentando também um consumo do biogás gerado. A partir do t=256h, ou seja, 10 dias após o início do teste, a produção de biogás volta a crescer.

Em situações onde o substrato (alimento) do reator é consumido e está presente em baixas concentrações, o sistema entra na fase endógena. Nessa situação, os microrganismos passam a utilizar como principal substrato o protoplasma celular (VON SPERLING, 2007). Entende-se que no teste 3, os reatores com glicose entraram em fase endógena a partir do t=256h.

Considerando a concentração inicial de substrato (glicose) de 2g/L, temos uma concentração teórica de DQO de 2,13gDQO/L. Sendo assim, o volume teórico de

produção de metano a partir do consumo do substrato é de aproximadamente 165,5mL.

A média de metano produzido nos reatores com glicose, está demonstrada na Figura 14, destacando em vermelho a linha de tendência do intervalo com maior taxa de produção de CH₄.



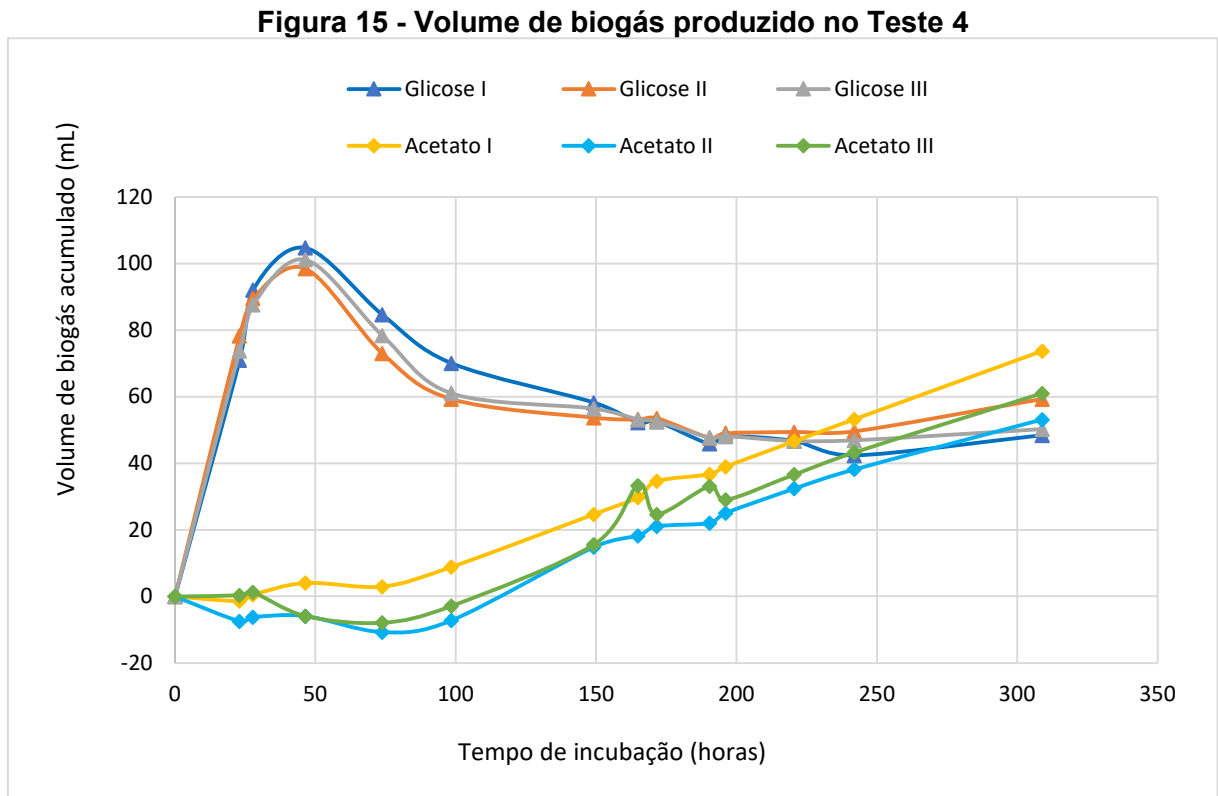
Fonte: Própria autora (2023)

O período de maior velocidade de produção de metano quando utilizada glicose como substrato foi compreendido entre o t=0h e t=23h, ou seja, no primeiro dia do teste. Nesse intervalo, a atividade metanogênica específica foi de 24,8mLCH₄/gSSV.d, e expresso em termos de DQO, temos uma AME de 0,06gDQO_{CH₄}/gSSV.d. O volume de metano acumulado até t=23h foi de 11,43mL, baseando-se na composição do biogás apresentada no tópico 4.5.

4.3 TESTE DA ATIVIDADE METANOGÊNICA ESPECÍFICA COM LODO DO REATOR UASB

O teste 4 de Atividade Metanogênica específica foi realizado com o inóculo coletado no reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição, tendo como base as

premissas entendidas como necessárias a partir dos testes preliminares. Além disso, o teste em questão foi analisado de forma mais refinada, apurando os dados brutos com base na Equação 14. No teste em questão, utilizou-se 3 reatores com acetato de sódio como substrato e 3 reatores com glicose. Os resultados de volume de biogás produzido por tempo de incubação estão demonstrados na Figura 15.



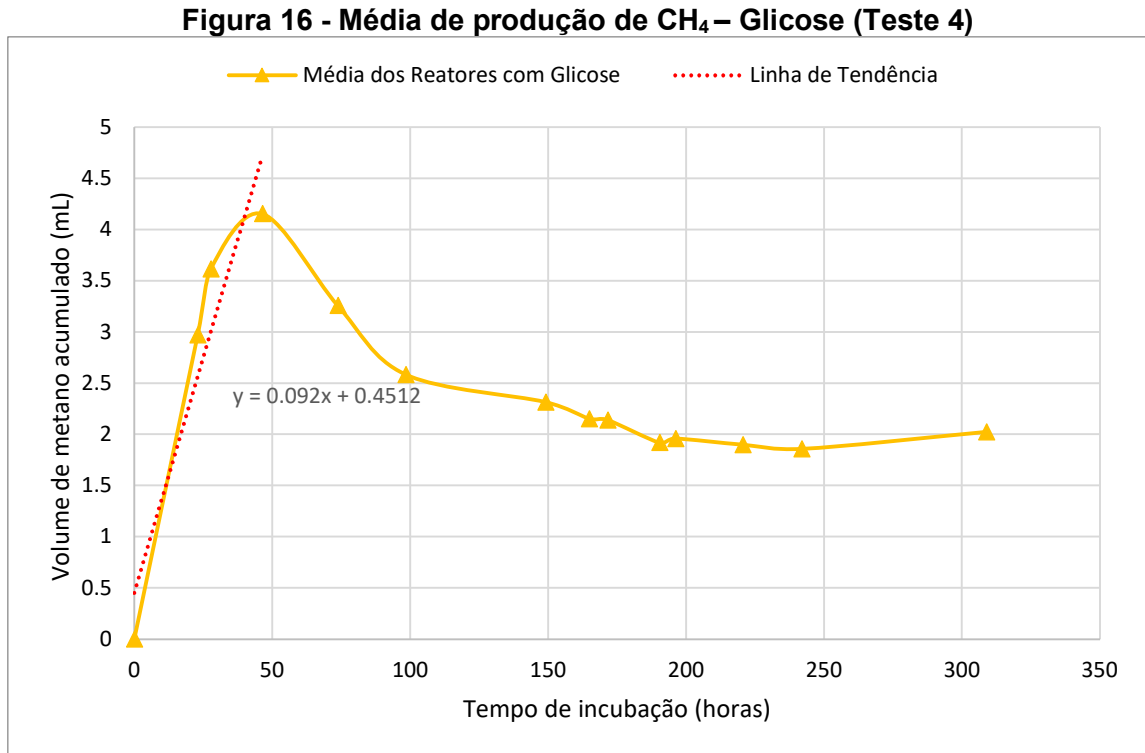
Fonte: Própria autora (2023)

A figura 15 demonstra o comportamento distinto entre a aplicação de diferentes substratos no teste de Atividade Metanogênica Específica. No caso dos reatores com glicose, a produção de biogás inicia rapidamente logo no início do teste, alcançando seu pico no $t=46h$, com um volume médio de biogás de 101,5mL. Após o $t=46h$, o sistema apresenta um consumo de biogás e sua posterior estabilização.

Em comparação com os testes preliminares realizados com glicose, o perfil de consumo de biogás foi mais evidente no Teste 4. Vale ressaltar que o Teste 4 foi realizado com a Amostra 2 de inóculo, diferente dos testes preliminares, diminuindo o período entre a coleta do inóculo e o início do teste.

Por mais que o volume de biogás acumulado no teste com glicose sejam superiores ao encontrado nos testes preliminares com o mesmo substrato, a

porcentagem de metano foi muito abaixo do esperado. A Figura 16 expõe o volume acumulado de metano durante o teste, considerando a composição de biogás (Tópico 4.5), bem como a linha de tendência do intervalo de produção de biogás mais acentuada.



Fonte: Própria autora (2023)

A aplicação de glicose como substrato resultou em uma produção máxima de metano de 4,15mL depois de 46 horas de teste. A atividade metanogênica específica deste lodo foi calculada em 4,42mLCH₄/gSSV.d, ou 0,011gDQO_{CH4}/gSSV.d. Considerando a DQO teórica de 2,13g/L no frasco reator, esperava-se uma produção de metano de aproximadamente 165,5mL, valor bastante distante do encontrado no teste AME.

Figura 17 - Frascos reatores com glicose após o período de incubação



Fonte: Própria autora (2023)

Em testes realizados com o inóculo do mesmo reator UASB, a atividade metanogênica foi calculada em 1,47mLCH₄/gSSV.d para um período experimental compreendido entre 0h e 4h (Sganzerla, 2013). No entanto, no estudo em questão, a proporção de Alimento/Microrganismos foi igual a 1,00, diferente do estudo atual, no qual foi utilizada uma proporção de 0,85, ou seja, uma maior disponibilidade de alimento.

Lima (2015) também utilizou glicose como substrato para o teste AME de um lodo oriundo de UASB de Estação de Tratamento de Esgoto. No estudo em questão, considerando uma A/M de 0,5, o volume máximo de CH₄ obtido foi de 3,16mL, após 3,79 dias do início do teste, com uma atividade metanogênica de 0,11gDQO/gSSV.d. Já em condições de A/M = 1,00, o volume de CH₄ foi de 2,97mL, após 7,93 dias do início do teste, com uma AME de 0,14gDQO/gSSV.d. Ainda, observou-se que a presença de alcalinidade do sistema não se mostrou suficiente para o tamponamento deste, levando ao acúmulo de AGV, que foi apontada como uma das causas da baixa produção de metano.

O teste 4 apresenta um comportamento bastante parecido com os testes preliminares em termos de velocidade de degradação da glicose, tendo em vista a

rápida produção de biogás nas primeiras horas de incubação. Além disso, o mesmo comportamento foi observado na pesquisa do Sganzerla (2013) e Lima (2015).

Araújo (2008) afirma que, embora a glicose seja uma molécula complexa, com seis carbonos, ela pode ser facilmente convertida em uma variedade de intermediários metabólicos, entre eles o acetato, butirato e etanol.

Ainda, os reatores foram submetidos à testes de pH após o encerramento do teste AME. Os reatores de glicose I, II e III apresentaram pH de 4,8, 4,9 e 4,7, respectivamente, sendo que os pHs iniciais eram de 7,7, 7,5 e 7,6.

Segundo Chernicharo (2007), quando a população de microrganismos está presente em quantidades adequadas em um reator e as condições ambientais são favoráveis ao seu desenvolvimento, os ácidos intermediários da degradação anaeróbia são consumidos assim que são formados. No entanto, em condições desfavoráveis, os microrganismos metanogênicos podem não ser capazes de consumir os ácidos formados nas etapas intermediárias da degradação anaeróbia, gerando um acúmulo de AGV no sistema. Nesses casos, a alcalinidade é consumida, os ácidos deixam de ser neutralizados, diminuindo o pH do meio.

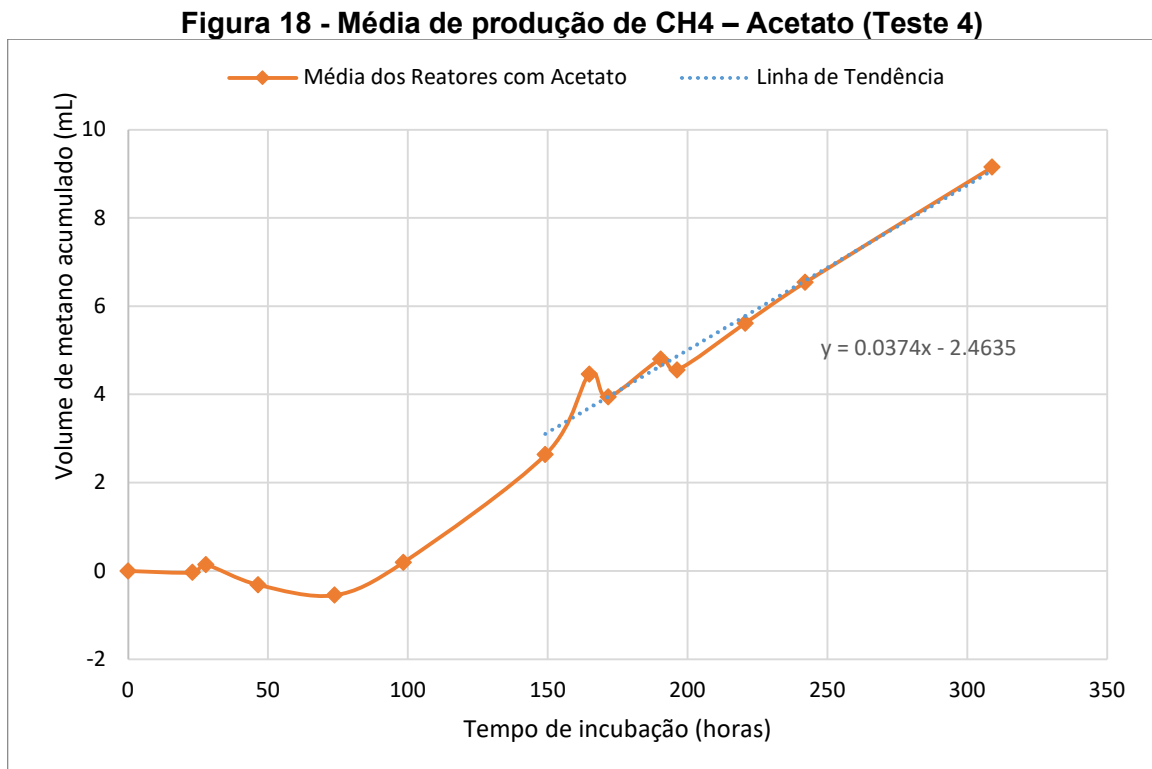
O comportamento descrito acima pode ser definido como inibição por feedback (Item 2.3.4.5), no qual o acúmulo de AGV gerado na degradação anaeróbia afeta as bactérias formadoras de metano. A inibição ocorre pode ocorrer de forma direta por conta da toxicidade dos ácidos, ou de forma indireta, pela diminuição de pH.

Em pesquisas acerca da degradação de glicose em reatores anaeróbicos com biofilme em batelada sequencial, foram avaliados que 2000mg/L de glicose foram completamente degradadas em um ciclo de 8 horas. Além disso, determinou-se que quando maior a concentração de glicose, maior era o acúmulo de ácidos, ocasionando leves quedas no pH do efluente. Verificou-se que a acidificação do meio, combinada a perda de eficiência do sistema ao longo do tempo, pode ser associada a rápida alimentação do reator, ou seja, por conta de um alimento de fácil degradação (Miqueleto, 2003).

Esses fatores demonstram que, o teste com o lodo da ETE da Lagoa da Conceição demonstrou uma rápida geração de metano nas primeiras horas de teste, assim como visualizado nos demais estudos. No entanto, o pico de metano foi muito abaixo do esperado teoricamente (165,5mL). Esse fator pode ser associado à um possível acúmulo de Ácidos Graxos Voláteis no sistema, que diminuiriam o pH do meio, afetando a atividade dos microrganismos metanogênicos.

Em contrapartida, os reatores de Acetato I, II e III apresentaram um comportamento diferente dos reatores com glicose, conforme demonstrado na Figura 15. Quando o substrato foi o acetato, a produção de biogás se mostrou mais lenta. O gráfico demonstra que o sistema permaneceu estabilizado até $t=98\text{h}$, ou seja, 4 dias após o início do teste. Após esse período, a produção de biogás permanece crescente, porém em velocidade menor, se comparado com a glicose. O teste foi encerrado no $t=309\text{h}$, quase 13 dias após o início do teste, apresentando um volume máximo de biogás de $62,60\text{mL}$, realizando a média dos três reatores.

A Figura 18 apresenta a média de produção de metano nos reatores com acetato, destacado em azul a linha de tendência do trecho de maior velocidade de produção de CH_4 .



Fonte: Própria autora (2023)

Utilizando acetato como substrato do teste AME, o volume acumulado de metano foi de $9,15\text{mL}$ após 309 horas de teste. Os reatores com glicose foram submetidos ao mesmo tempo de incubação, porém obtiveram um volume acumulado de metano de $4,15\text{mL}$, sendo duas vezes menor do que os reatores com acetato. A atividade metanogênica específica calculada para os reatores de acetato foram de

1,79mLCH₄/gSSV.d ou 0,004gDQO_{CH₄}/gSSV.d. A DQO teórica aplicada nos reatores com acetato foi de 2,14g/L, com isso, a estimativa de produção de metano era de 166,3mL.

Os reatores com acetato também foram submetidos à teste de pH antes e depois do período de incubação. Os reatores I, II e III apresentavam inicialmente um pH na ordem de 7,7. Ao final do teste AME, o pH foi medido na ordem de 6,8.

Figura 19 - Frascos reatores com acetato após o período de incubação



Fonte: Própria autora (2023)

Sganzerla (2013), avaliou a atividade metanogênica no lodo retirado no mesmo reator UASB do estudo atual, da ETE da Lagoa da Conceição, no entanto, utilizou-se Ácido Acético como substrato. No trabalho em questão, a atividade metanogênica máxima foi de 0,30mLCH₄/gSSV.d. Esse fator demonstra uma atividade mais efetiva dos microrganismos metanogênicos com o uso de acetato, bem como uma melhor atividade metanogênica do inóculo coletado para este estudo.

Rocha et al. (2001) também avaliou a atividade metanogênica específica do lodo de reator UASB alimentado por esgoto doméstico através do uso de acetato como substrato. No estudo, os frascos foram incubados com 2gDQO/L de substrato e 0,57gSSV/L de inóculo, o que resultou em uma atividade metanogênica específica de 0,21gDQO_{CH₄}/gSSV.d.

Ainda, Paez (2019) realizou testes de atividade metanogênica específica com lodo coletado de reator UASB com esgoto sanitário. Para o trabalho em questão, a relação de A/M utilizada foi de 0,5, sendo que a concentração de acetato de sódio (substrato) foi de 2g/L. A máxima atividade metanogênica encontrada no estudo foi de 0,055gDQO_{CH₄}/gSSV.d. A autora aponta como possível causa da baixa atividade metanogênica do reator a composição do efluente tratado no UASB. A coleta do inóculo ocorreu na ETE da Universidade Federal de Lavras, que coleta efluentes do campus. No entanto, cita-se a possível ocorrência de descartes inadequados de produtos químicos dos laboratórios nos dispositivos sanitários da UFLA, sendo assim consequentemente o reator UASB pode ser afetado pelos produtos químicos, levando a alterações da comunidade microbiana do reator.

Durante a degradação anaeróbia, 70% do metano produzido é advindo da clivagem do acetato realizada pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas. Dessa forma, o teste AME que utiliza acetato como substrato subestima em aproximadamente 30% da capacidade máxima de produção de metano, tendo em vista que não considera a produção de metano pelas bactérias hidrogenotróficas (Aquino et al., 2007).

De acordo com Chernicharo (2007), lodos anaeróbios advindos de reatores com esgoto doméstico, a atividade metanogênica normalmente está entre 0,3 e 0,4gDQO/gSSV.d. Esse valor define o limite para de carga orgânica que pode ser aplicada no reator, garantindo a eficiência do sistema.

A Tabela 7 apresenta o resumo de resultados dos testes AME, comparando com o encontrado na literatura.

Tabela 7 - Resumo de Resultados Teste AME e Comparação com Literatura

Teste AME		Substrato	A/M	Resultado AME	
				mLCH ₄ /gSSV.d	gDQO _{CH₄} /gSSV.d
Estudo Atual	3	Acetato	0.86	1.536	0.004
	3	Glicose	0.85	24.859	0.063
	4	Acetato	0.86	1.795	0.004
	4	Glicose	0.85	4.416	0.011
Estudo com o mesmo inóculo (Sganzerla, 2013)		Glicose	1.00	1.470	-
		Ácido Acético	1.00	0.300	-
Lima (2015)		Glicose	0.50	-	0.110
			1.00	-	0.140
Rocha et al. (2001)		Acetato	3.50	-	0.210
Paez (2019)		Acetato	0.50	-	0.055
Chernicharo (2007) - Valor esperado do teste AME em lodos de reatores com esgoto doméstico		-	-	-	0.300 -0.400

Fonte: Própria autora (2023)

A comparação do estudo atual com dados de literatura auxilia no entendimento dos resultados, porém, a inexistência de padronização do procedimento para o teste AME dificulta uma comparação direta.

Os testes 3 e 4 foram realizados com inóculos coletados em dias distintos, o que explica os resultados distintos em cada um dos testes. Além disso, vale ressaltar que o teste 3 se trata de um teste preliminar, no qual não houve um refinamento dos dados, assim como foi realizado no teste 4. No entanto, os reatores com acetato apresentaram resultados próximos, mesmo com inóculos com características um pouco diferentes. Esse comportamento demonstra uma maior segurança na utilização de acetato como substrato, além do maior volume acumulado de metano nesses testes.

O teste com glicose demonstrou resultados de AME superiores ao encontrado no inóculo da mesma ETE porém no ano de 2013. No entanto, se em comparação com o estudo de Lima (2015), os resultados foram inferiores.

No caso do acetato, os resultados de AME também foram superiores ao encontrado para o inóculo da ETE da Lagoa da Conceição em 2013. Porém, comparando com as demais literaturas, o resultado se mostra inferior.

Ainda, os resultados obtidos demonstram que independente do substrato utilizado, a atividade metanogênica do inóculo pode ser caracterizada como baixa, não alcançando os valores esperados (entre 0,3 e 0,4 gDQO/gSSV.d). Os volumes acumulados de metano também se mostraram extremamente baixos se em comparação ao esperado pela quantidade de DQO inserida no sistema.

Conhecer a atividade metanogênica específica do lodo de algum reator fornece dados para a avaliação da capacidade máxima de remoção de DQO da fase líquida. Sendo assim, o teste AME permite estimar a carga orgânica máxima que pode ser aplicada no reator sem causar desbalanceamento do processo anaeróbio (Aquino et al., 2007).

Para avaliar a carga orgânica máxima do reator UASB da Lagoa da Conceição, considerou-se a atividade metanogênica de 0,004gDQO/gSSV.d do inóculo, uma concentração de 8,38gSSV/L no lodo, além do volume do reator UASB de 1620m³. Com isso, calcula-se que com a atividade metanogênica encontrada no presente estudo, o reator UASB seria capaz de suportar no máximo 61,8kgDQO/d.

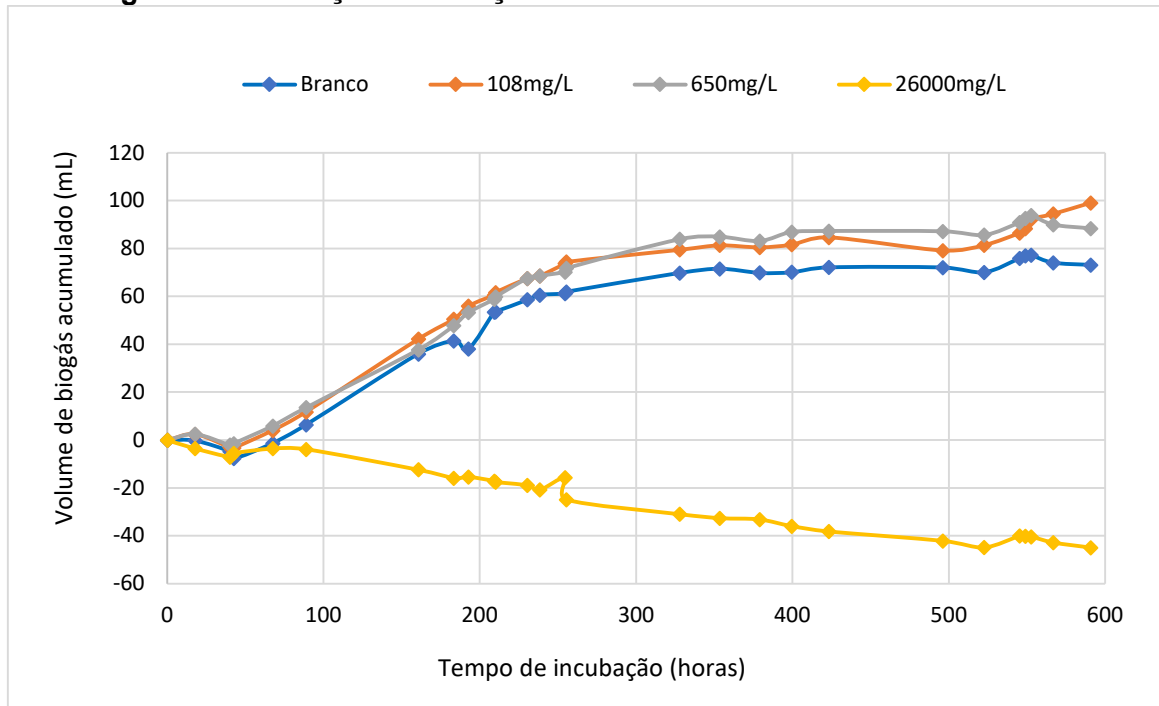
Considerando a concentração média de 466mgDQO/L, o reator UASB somente seria carregado com a carga máxima encontrada se a vazão fosse de no máximo 1,5l/s, no entanto, o reator recebe aproximadamente 24,5l/s. Através dos dados fornecidos pela CASAN, atualmente o reator UASB recebe cerca de 986kgDQO/d, ou seja, uma carga 16 vezes maior do que o suportado, de acordo com o teste AME.

Esse resultado expõe que as condições atuais do reator UASB, bem como as características do lodo biológico, não são suficientes para atender as demandas do efluente que chega na estação. Para atender a carga orgânica que a ETE recebe diariamente, a atividade metanogênica do lodo deveria ser de no mínimo 0,07gDQO/gSSV.d.

4.4 AVALIAÇÃO DA INIBIÇÃO DA ATIVIDADE METANOGENICA POR POLICLORETO DE ALUMÍNIO

O teste de avaliação da inibição da atividade metanogênica foi realizado através da adição de diferentes concentrações de Policloreto de Alumínio (PAC) no inóculo do UASB da Lagoa da Conceição e no lodo de esterco bovino. A Figura 20 demonstra o volume acumulado de biogás através das diferentes concentrações de PAC no lodo do UASB.

Figura 20: Avaliação da inibição de AME através do PAC – Lodo UASB

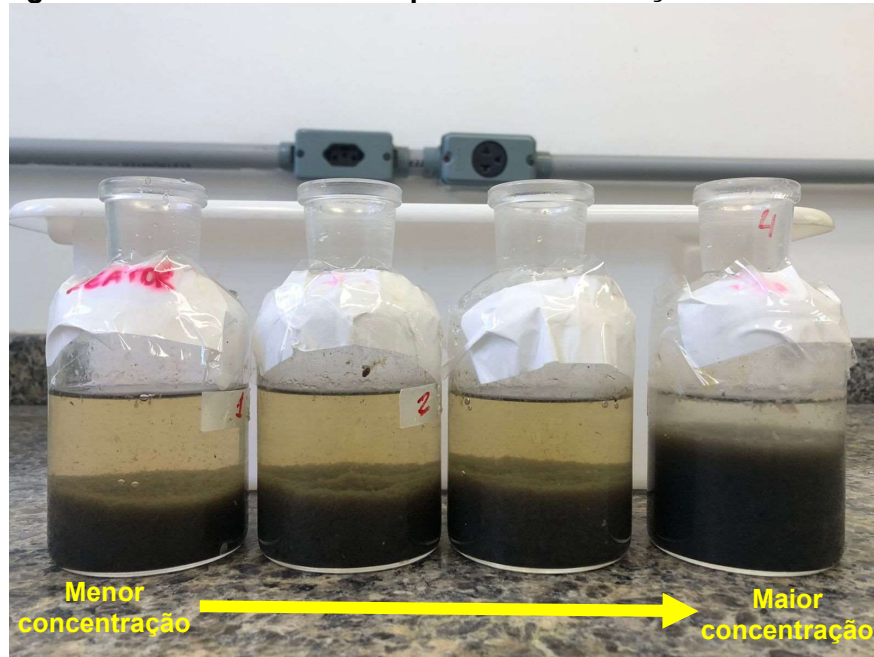


Fonte: Própria autora (2023)

Nota-se que os quatro frascos reatores apresentaram uma fase estacionária no início do teste, com pequeno consumo de biogás. Após o $t=42h$, os reatores branco, 108mg/L e 650mg/L apresentaram um crescimento constante seguido de estabilização no $t=353h$. Em contra partida, o reator com 26000mg/L de PAC não apresentou geração de biogás, somente consumo do gás provavelmente já presente no tubo eudiômetro.

Os reatores com 108mg/L, 650mg/L e o branco demonstraram desempenho bastante parecido em termos de geração de biogás. No entanto, a alta concentração, demonstrada pelo frasco com 26000mg/L de PAC, reflete a capacidade de inibição da atividade microbiana através da adição desse produto

Figura 21: Frascos reatores após teste de inibição – Lodo UASB



Fonte: Própria autora (2023)

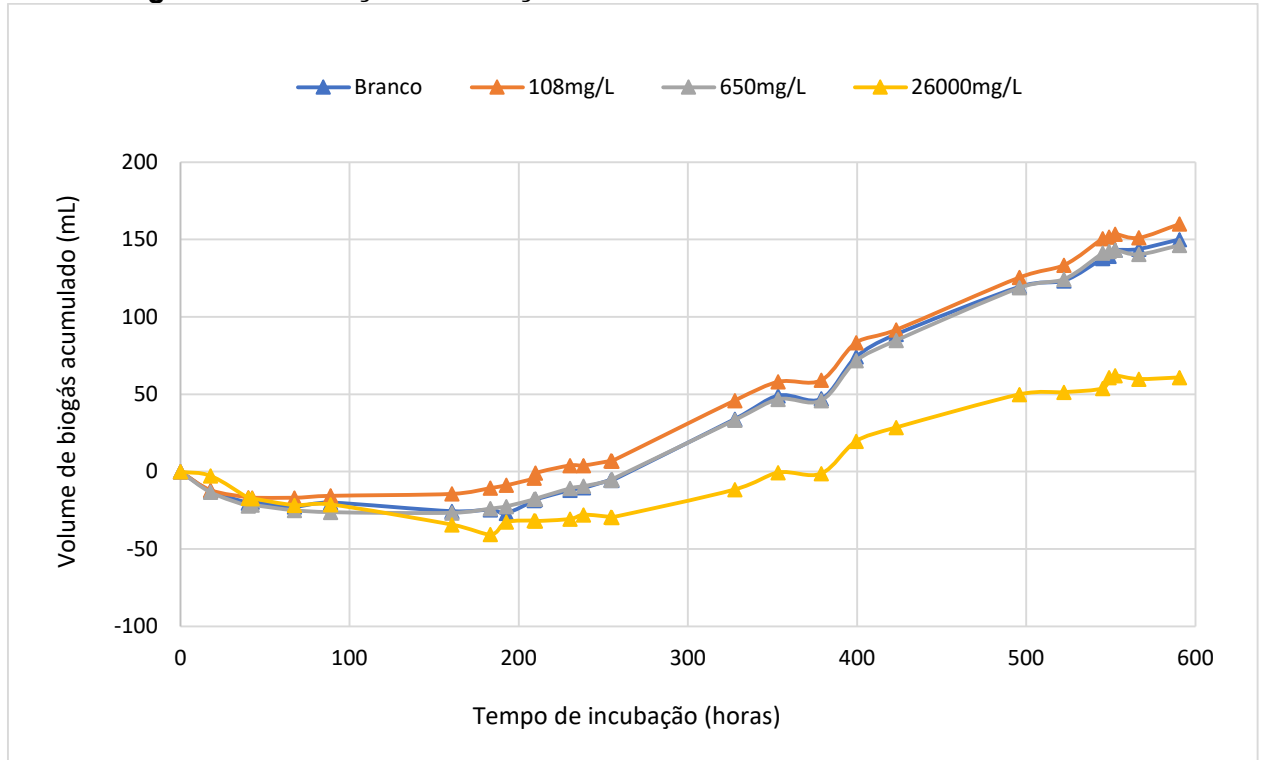
Refletindo sobre a condição atual do reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição, sabe-se que o Policloreto de Alumínio tem sido aplicado na concentração de aproximadamente 108mg/L no valo de oxidação, sendo que somente parte disso é direcionado ao reator UASB. Sendo assim, há uma dificuldade de estimar a real concentração de PAC no reator. Além disso, pouco se sabe do comportamento desta substância dentro do UASB, ou seja, o acúmulo deste material que pode ser gerado com a aplicação constante do PAC por longo período de tempo.

Nesse sentido, a concentração de 26000mg/L expõe que o acúmulo de PAC no reator UASB pode ser uma futura preocupação para ETE da Lagoa da Conceição. Comparando os resultados obtidos no Teste 4, vemos que a inibição de PAC ainda não chegou na sua concentração crítica, mas não significa que isso não possa ocorrer com o passar do tempo.

Além disso, Sganzerla (2013) demonstrou atividades metanogênicas inferiores ao encontrado no estudo atual, conforme demonstrado na Tabela 7. Considerando que, no período de estudo no Sganzerla, a ETE ainda não realizava o uso no PAC no processo de tratamento, pode-se relacionar a melhora nos resultados até o momento justamente com a aplicação desta substância.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos com um lodo limpo de concentrações prévias de PAC, utilizou-se o esterco bovino como inóculo. Os resultados obtidos se encontram a Figura 22.

Figura 22: Avaliação da inibição de AME através do PAC – Lodo UASB

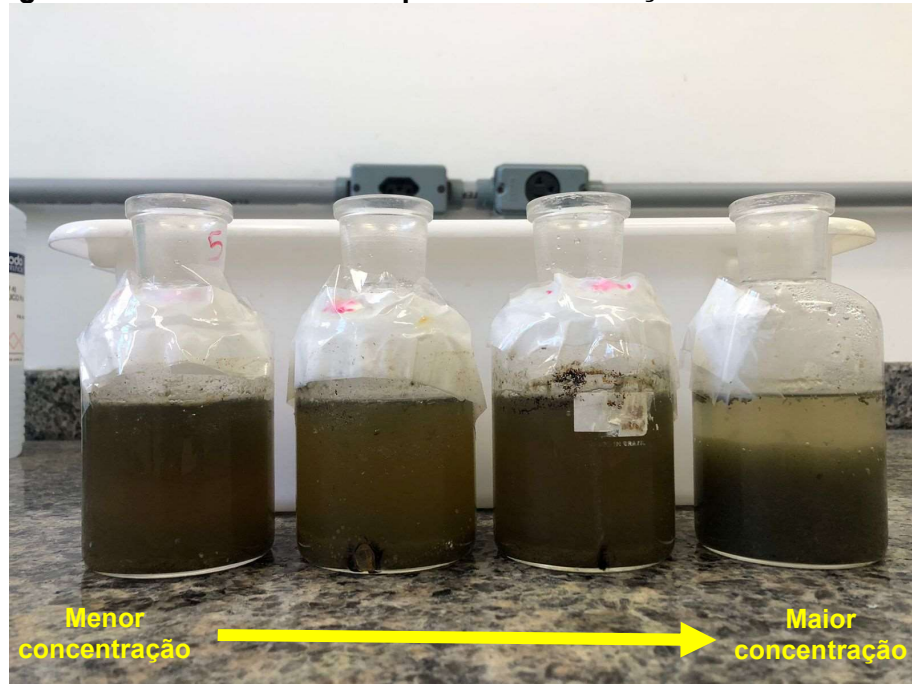


Fonte: Própria autora (2023)

O inóculo de esterco bovino apresentou um comportamento distinto do observado anteriormente. Nesse caso, a produção de biogás iniciou somente a partir do $t=183h$, ou seja, após 7 dias de início do teste. Isso demonstra que esse inóculo precisa de um maior tempo de adaptação nas condições experimentares se em comparação com lodo do UASB.

Após o período de adaptação, a produção de biogás teve um crescimento constante até $t=553h$. Os picos de biogás obtidos foram superiores ao encontrado no teste com inóculo do reator UASB. Esse comportamento demonstra uma atividade metanogênica mais efetiva dessa biomassa.

Figura 23: Frascos reatores após teste de inibição – Esterco Bovino



Fonte: Própria autora (2023)

Em termos de inibição, as concentrações de PAC que geraram a maior geração de biogás foi de 108mg/L, seguido de 650mg/L e 26000mg/L, bem como no teste com o inóculo da ETE. No entanto, no frasco de maior concentração, ainda que a produção de biogás observada tenha sido menor, o sistema apresentou produção de metano crescente, bem como os outros frascos. Ou seja, ocorreu inibição da atividade metanogênica, porém em níveis mais baixos do que no inóculo do UASB. Esse comportamento pode estar relacionado com o fato que, o lodo do UASB em “branco” já havia concentrações de PAC devido à adição na ETE, diferente do esterco bovino que não apresentava essa substância. Sendo assim, o esterco bovino não atingiu a mesma concentração crítica que o outro inóculo.

O Quadro 6 resume os resultados encontrados nos testes de inibição:

Quadro 6: Resumo dos resultados do teste de inibição com PAC

Inóculo	Concentração de PAC (mg/L)	Concentração de Al ₂ O ₃ * (mg/L)	Volume de biogás (mL)	Volume de metano (mL)	AME (gDQOCH ₄ /g SSV.d)
UASB	Branco	-	77.07	15.49	0.007
	108	11.1	99.13	20.52	0.008
	650	66.8	93.92	19.54	0.008
	26000	2670.2	-	-	0,000
Esterco bovino	Branco	-	150.06	32.56	0.013
	108	11.1	160.02	41.61	0.015
	650	66.8	146.35	35.12	0.015
	26000	2670.2	60.89	11.20	0.007

*A especificação técnica do PAC demonstra um teor de Al₂O₃ de 10,27%

Fonte: Própria autora (2023)

A partir dos resultados de AME obtidos, comprova-se uma inibição de PAC em concentrações acima de 26000mg/L, diminuindo consideravelmente a capacidade da biomassa em converter matéria orgânica em metano. Além disso, demonstra um pequeno aumento na taxa de AME com baixas concentrações de PAC.

Ao comparar os sistemas em branco, nota-se um resultado de AME bastante superior do esterco bovino. Esse resultado reforça a deficiência presente no inóculo coletado no UASB da ETE da Lagoa da Conceição, no qual a produção metano é bastante inferior.

A literatura atual não conta com estudos de inibição da atividade metanogênica por adição de PAC, somente foi encontrado estudo nesses termos pelos autores Kim e Chung (2015). No entanto, os resultados deste estudo apresentaram diminuição na taxa de conversão de substratos orgânicos em ácidos graxos voláteis em 10% em concentrações de PAC acima de 46mg/L.

Contudo, a diminuição de conversão de substratos orgânicos em AGV diz respeito à atividade das bactérias acidogênicas. Já o presente estudo, utilizou acetato como substrato, portanto a avaliação diz respeito à atividade das bactérias metanogênicas.

4.5 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DO BIOGÁS

Inicialmente foi realizada uma avaliação preliminar o biogás gerado no Teste Preliminar 3, a fim de compreender o comportamento do reator. A análise do biogás

ocorreu no dia 20/09/2023, no t=48h do teste. O resultado a análise de composição do biogás está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição preliminar do biogás (Teste 3)

COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS		
	Reator 1 (Acetato de Sódio)	Reator 4 (Glicose)
CH₄ (%)	0,2	0,3
CO₂ (%)	0,9	4,0
O₂ (%)	17,0	14,2
H₂S (ppm)	0,0	350,0
Outros Gases (%)	81,9	81,5

Fonte: Própria autora (2023)

A tabela 5, previamente apresentada, demonstra os valores típicos encontrados para concentração de biogás em reatores anaeróbios. Espera-se que a porcentagem de metano no biogás seja entre 60 a 85%, além disso, o gás carbônico deve estar entre 5 a 15%.

Analisando a composição encontrada no biogás do Teste 3, nota-se que diferentemente dos valores típicos a geração de metano e gás carbônico foi considerada baixa. Além disso, o elemento predominante no biogás foi o oxigênio, em concentração bem maior do que o encontrado em reatores anaeróbios. Entende-se que a presença de oxigênio no sistema tenha favorecido organismos facultativos normalmente presentes em lodos anaeróbios, ou ainda organismos aeróbios. Esse fator é uma possível causa de consumo do biogás gerado durante o teste AME, podendo ser considerado um consumo de oxigênio por estes microrganismos. Isso demonstra a necessidade da uma purga com nitrogênio nas amostras por um maior tempo, garantindo a característica anaeróbia do sistema.

Ao final do Teste 3, a composição do biogás também foi analisada, descartando os Reatores Acetato I e Glicose I, nos quais parte do biogás já havia sido retirada do sistema para anterior medição. Os dados obtidos estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Composição do biogás – Teste 3

COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS				
	Acetato II	Acetato III	Glicose II	Glicose III
CH₄ (%)	17,5	17,3	14,6	16,4
CO₂ (%)	6,0	5,3	14,5	14,8
O₂ (%)	2,6	2,0	3,2	2,5
H₂S (ppm)	18,0	2,0	805,0	735,0
Outros gases (%)	74,0	75,5	67,6	66,4

Fonte: Própria autora (2023)

Nota-se que os reatores Acetato II e Acetato III apresentaram maiores níveis de metano do que na primeira análise, tendo em vista que os níveis de produção de biogás do teste só começaram a crescer depois do t=48h, ou seja, após a primeira análise de composição do biogás.

Os reatores Glicose II e Glicose III demonstraram um crescimento significativo na porcentagem de metano. Esse comportamento atesta que na fase inicial de produção de biogás, por mais que a velocidade tenha se mostrado acelerada, a produção de metano foi baixa. Já na análise realizada ao final do teste, a porcentagem de metano é maior, ou seja, a fase endógena do processo foi o intervalo com maior produção de metano.

O teste 4 também contou com análise da composição do biogás ao final do teste, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição do biogás – Teste 4

COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS						
	Glicose I	Glicose II	Glicose III	Acetato I	Acetato II	Acetato III
CH₄ (%)	3,3	4,9	4,0	15,2	11,5	15,1
CO₂ (%)	15,6	13,7	13,9	5,9	4,4	5,4
O₂ (%)	5,9	4,8	4,4	4,3	6,0	3,3
H₂S (ppm)	838,0	893,0	885,0	154,0	11,0	62,0
Outros gases	75,2	76,6	77,6	74,5	78,1	76,1

Fonte: Própria autora (2023)

Os reatores com glicose apresentaram níveis de metano bastante abaixo do esperado, sendo também menores do que a porcentagem encontrada nos reatores com acetato. A concentração de CO₂ foram superiores à concentração de CH₄. Lima

(2015), que também realizou teste AME com uso de glicose, afirma que grande parte do biogás produzido nesse processo estava composto por CO_2 , acredita-se que esse fator está relacionado com o acúmulo de AGV presente no sistema, não fornecendo um ambiente propício aos microrganismos metanogênicos.

Ainda, nota-se uma concentração significativa de H_2S no biogás gerado nos sistemas alimentados com glicose. De acordo com Chernicharo (2007), a inibição da digestão anaeróbia por sulfeto depende da concentração não dissociada de sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo que esta forma é predominante em pH abaixo de 7. Sendo assim, o H_2S , que pode estar presente na fase líquida ou gasosa, em altas concentrações é capaz de causar inibição da atividade metanogênica, bem como maus odores e problemas de corrosão nos equipamentos.

Dessa forma, entende-se que o pH mais baixo dos reatores com glicose explica a maior presença de H_2S no biogás. Esse fator também se mostra como uma das causas de inibição da atividade metanogênica, resultando em baixas concentrações de metano no biogás.

Já os reatores de acetato apresentam uma porcentagem de metano mais significativa, porém ainda menor do que esperado pela literatura (entre 60% e 85%). No entanto, os níveis de CH_4 são superiores aos níveis de CO_2 , demonstrando um processo de degradação anaeróbia mais equilibrado.

Os baixos níveis de metano na composição do biogás, compilados à baixa geração de biogás nos testes de atividade metanogênica específica, comprovam uma baixa atividade microbiana do inóculo analisado. Os resultados encontrados refletem uma dificuldade de degradação de matéria orgânica inserida no sistema, a qual pode estar afetada por diferentes fatores.

Ainda, nota-se que o nível de oxigênio encontrado ao final do teste 3 e teste 4 são inferiores à análise realizada no meio do teste 3. Isso demonstra que de fato o sistema possui uma característica de consumo de oxigênio pelos microrganismos presentes no lodo incubado. No entanto, mesmo nas análises de fim de teste, o nível de oxigênio se encontra acima do esperado. Por mais que os frascos reatores tenham sido submetidos à purga com nitrogênio, entende-se que oxigênio presente do sistema estava inicialmente dentro dos tubos eudiômetros.

4.5.1 Composição do biogás – Testes de Inibição por PAC

O teste de inibição da atividade metanogênica através da adição de PAC também foi acompanhada de análise de composição do biogás. Os percentuais do biogás estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição do biogás – Teste com PAC

	Lodo UASB				Esterco Bovino			
	Branco	108mg/L	650mg/L	26000mg/L	Branco	108mg/L	650mg/L	26000mg/L
CH₄ (%)	20,1	20,7	20,8	0,5	21,7	26,0	24,0	18,4
CO₂ (%)	7,3	7,5	6,8	5,0	9,8	9,8	10,1	6,4
O₂ (%)	1,8	0,9	1,7	1,8	1,6	0,9	1,1	1,1
H₂S (ppm)	22	41	31	14	5	303	74	2369
Outros gases	70,7	70,9	70,7	92,8	66,8	63,3	64,9	74,1

Fonte: Própria autora (2023)

O sistema com lodo do reator UASB apresentou percentual de metano muito próximo nas concentrações mais baixas de PAC. No entanto, com concentração de PAC de 26000mg/L, o percentual de metano gerado foi próximo de zero. Esse fato, combinado à não observação de geração de biogás nesse frasco reator, comprova a inibição da atividade metanogênica nessas concentrações.

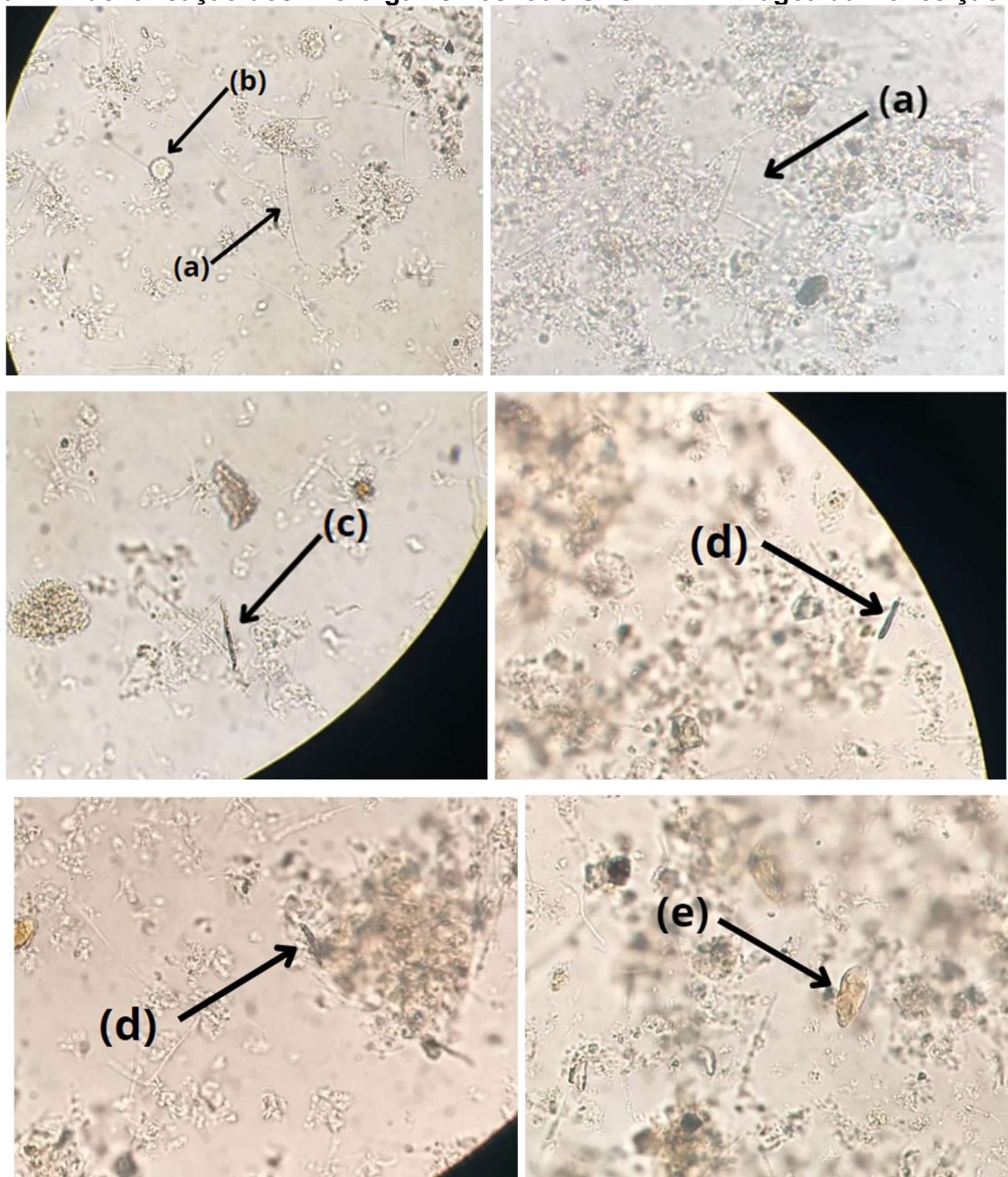
O teste realizado com esterco bovino apresentou concentrações de metano ligeiramente superiores ao encontrados no sistema com o inóculo retirado do UASB. Nesse teste, a presença de metano no sistema com 26000mgPAC/L também foi inferior se em comparação com as outras concentrações, porém ainda sim houve a geração de metano.

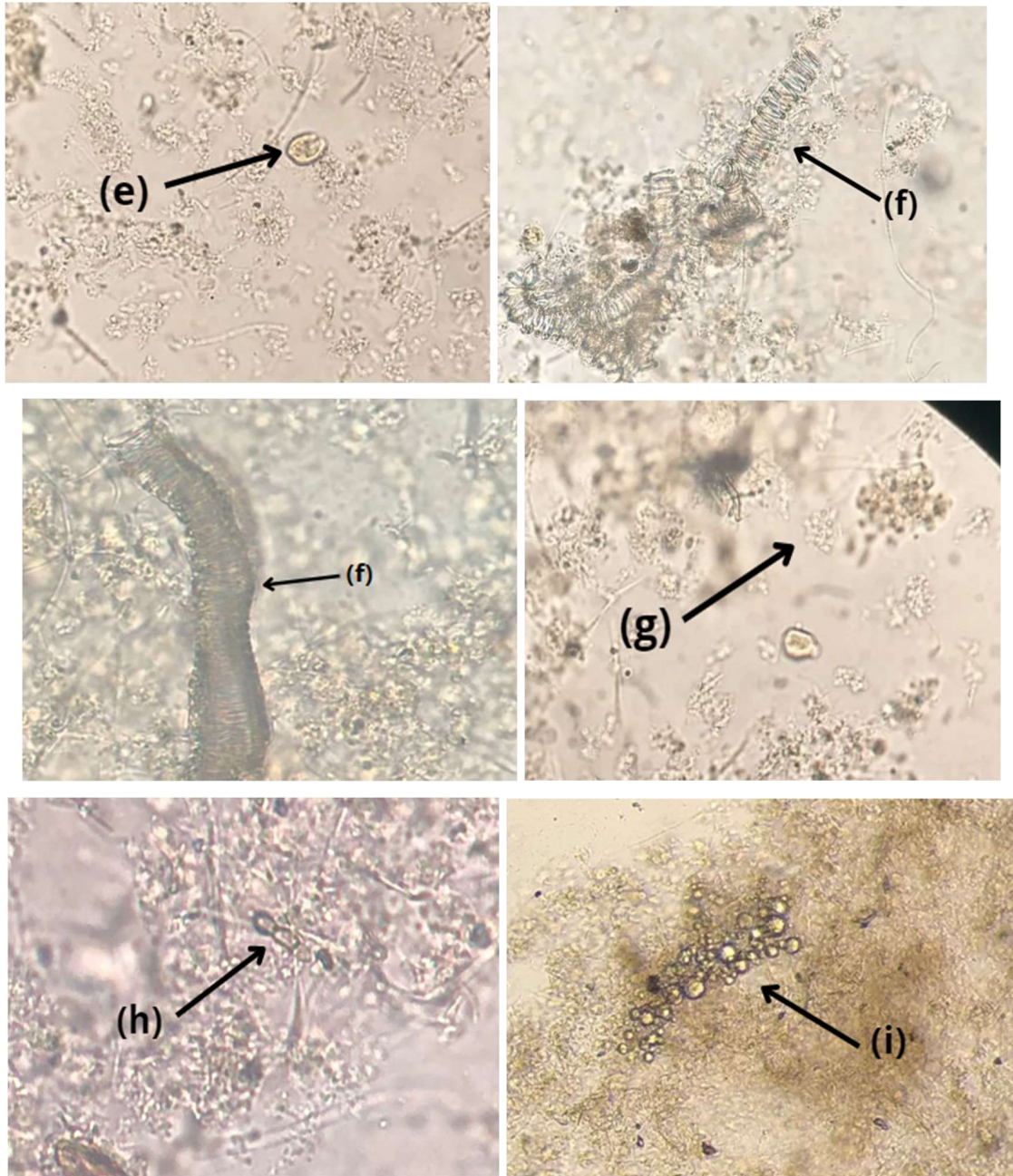
Conclui-se que, de fato pode-se confirmar a inibição da atividade metanogênica na adição de PAC em concentração de 26000mg/L. Porém, acredita-se que a inibição mais crítica esteja em concentrações ainda maiores, tendo em vista o comportamento do esterco bovino.

4.6 IDENTIFICAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS MICRORGANISMOS PRESENTES NO LODO ANAERÓBIO

Com a intenção de compreender as características do inóculo aplicado no teste de atividade metanogênica específica, visualizou-se amostras do lodo anaeróbico no microscópio. As imagens foram comparadas com estudos realizados acerca da microscopia do lodo anaeróbico (Miqueleto, 2003; Motteran, 2013; Pereira, 2004), além da Microbiologia de Brock (Madigan et al., 2016). As figuras abaixo demonstram os microrganismos identificados no inóculo.

Figura 24 - Identificação dos microrganismos lodo UASB – ETE Lagoa da Conceição





(a) Bactérias filamentosas. (b) Estruturas semelhantes à cistos de protozoários. (c) Cocos em cadeia. (d) Bacilo reto. (e) Protozoário. (f) Espiroqueta. (g) Cocos irregulares em pacotes. (h) Bacilos curtos. (i) Cocos. Fonte: Própria autora (2023)

O lodo anaeróbio normalmente é composto por microrganismos de diferentes morfologias. Assim como o esperado, foram encontradas diferentes morfologias no atual estudo. Foi visualizada uma alta presença de bactérias filamentosas, essas podem ser associadas às *Methanosaetas*. Esse gênero de bactérias utiliza exclusivamente o acetato como substrato, além de desempenhar um papel importante na formação da textura bacteriana presente nos grânulos (Chernicharo, 2007).

Ainda, foram visualizadas bactérias com morfologia de espiroqueta. Do grupo das bactérias metanogênicas, podemos relacionar essa morfologia com *Methanospirillum*, que produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Também foi possível encontrar cocos irregulares em pacotes, morfologia bastante características das *Methanosarcinas*, que são microrganismos bastantes versáteis, sendo capazes de utilizar acetato, hidrogênio e metilaminas (Chernicharo, 2007; Madigan et al., 2016).

Na microscopia também foram encontrados bacilos retos e curtos, além de cocos individuais e em cadeia, podendo ser relacionado com uma série de bactérias metanogênicas, conforme Quadro 1. Além disso foi possível visualizar estruturas parecidas com protozoários e cistos de protozoários.

5 CONCLUSÃO

Através do presente estudo, foi possível avaliar a atividade metanogênica específica do lodo coletado no reator UASB da Estação de Tratamento de Efluentes da Lagoa da Conceição. Através da aplicação do teste AME obteve-se resultados acerca a produção de metano em determinado período de tempo, além da avaliação da carga orgânica máxima que o reator pode ser submetido e análise de inibição da atividade metanogênica pela adição de Policloreto de Alumínio.

A aplicação de glicose como substrato no teste de Atividade Metanogênica Específica resultou em $0,011\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV.d}$. O comportamento dos reatores com tal substrato demonstraram rápido consumo de glicose, seguido por possível acúmulo de Ácidos Graxos Voláteis no sistema. Sendo assim, o pH dos frascos reatores sofreram decréscimo, inibindo a atividade das bactérias metanogênicas, resultando em baixa geração de metano (4,15mL em 46 horas).

Nos testes com acetato de sódio como substrato, acumulou-se 9,22mL em 309 horas de teste. A biomassa do sistema demonstrou a necessidade de um maior tempo de adaptação até o início da produção de biogás, se em comparação com a glicose, porém a geração de metano foi mais significativa. A atividade metanogênica específica foi calculada em $0,004\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV.d}$

Com isso, a atividade metanogênica do lodo se mostrou baixa em comparação com a literatura e com o indicado para reatores UASB, tanto para glicose, quanto para acetato. Dessa forma, determina-se que o reator UASB da ETE da Lagoa da Conceição teria capacidade de suportar no máximo uma carga orgânica de $64,8\text{kgDQO/d}$, sendo uma carga 16 vezes menor do que a carga aplicada atualmente de 986kgDQO/d .

Ainda, conclui-se que o Policloreto de Alumínio aplicado na estação não demonstrou inibição em baixas concentrações, não sendo a causa para baixa atividade microbiana atual. No entanto, o acúmulo de PAC pode ser tornar um problema, tendo em vista a diminuição de AME na presença de concentração de PAC em 26000mg/L .

A análise de composição do biogás além de auxiliar na determinação do volume de metano gerado pelo sistema, comprovou que o biogás gerado não possui concentrações de metano dentro do esperado. Esse fator fortaleceu a tese de que o

sistema não tem demonstrado boa atividade microbiana em termos de conversão da matéria orgânica em CH₄.

Como exposto no estudo, existem diferentes fatores que afetam a digestão anaeróbia em reatores para tratamento de efluentes. O presente estudo comprovou através da ferramenta do teste AME a baixa capacidade de produção de biogás no reator analisado, que indica que a biomassa não está com o metabolismo adequado, mesmo com condições controladas de pH, alcalinidade, temperatura e disposição de nutrientes.

Dessa forma, a performance real do UASB da ETE da Lagoa da Conceição deve ser estudada de maneira mais aprofundada, com foco no potencial de inibição de agentes químicos no metabolismo de organismos anaeróbios. Recomenda-se que, em estudos futuros, o teste de AME seja acompanhado de análises de Ácidos Graxos Voláteis, bem como análises de DQO antes e depois do teste. Ainda, acredita-se que a avaliação da mudança de algumas condições experimentares, como temperatura e concentração de SSV no reator, além de uma avaliação microbiológica mais completa, podem oferecer respostas mais claras sobre o déficit encontrado na atividade microbiana do inóculo estudado.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. M. DOS S. **Estudo e Caracterização de Digestores Anaeróbios de Leito Fixo**. Dissertação—Braga: Universidade do Minho, 23 jul. 1998.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington: [s.n.].
- AQUINO, S. F. et al. Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, p. 192–201, abr. 2007.
- ARAÚJO, A. M. DE. **Tratamento Aneróbio do Líquido da Casca de Coco Verde Utilizando Reator UASB**. Dissertação—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2008.
- CABIROL, N. et al. Effect of aluminium and sulphate on anaerobic digestion of sludge from wastewater enhanced primary treatment. **Water Science and Technology**, p. 235–240, 2003.
- CASAN. **CASAN Investe em Melhorias no Sistema de Saneamento da Lagoa da Conceição**. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/casan-investe-em-melhorias-no-sistema-de-saneamento-da-lagoa-da-conceicao-3#0>>. Acesso em: 26 set. 2023.
- CHEN, J. L. et al. **Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review** *Biotechnology Advances*. [s.l.] Elsevier Inc., 1 dez. 2014.
- CHERNICHARO, C. A. DE L. **Anaerobic reactors**. Londres: IWA Publishing, 2007.
- GERARDI, M. H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2003.
- HICKEY, R. F.; VANDERWIELEN, J.; SWITZENBAUM, M. S. THE EFFECT OF HEAVY METALS ON METHANE PRODUCTION AND HYDROGEN AND CARBON MONOXIDE LEVELS DURING BATCH ANAEROBIC SLUDGE DIGESTION. **Water Research**, v. 23, n. 2, p. 207–218, fev. 1989.
- JACKSON-MOSS, C. A.; DUNCAN, J. R. THE EFFECT OF ALUMINIUM ON ANAEROBIC DIGESTION. **Biotechnology Letters**, v. 13, p. 143–148, 1991.
- JU, F. et al. Anaerobic digestion of chemically enhanced primary treatment (CEPT) sludge and the microbial community structure. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 20, p. 8975–8982, 27 out. 2016.
- KIM, J. O.; CHUNG, J. Inhibitory effects of inorganic and organic coagulants on acidogenic fermentation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, n. 3, p. 572–577, 1 mar. 2015.

LIMA, N. C. **Análise de Tipos e Concentrações de Inóculos para Potencializar a Geração de Biogás na Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Bairro Planalto Pici, Fortaleza-CE.** Dissertação—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 27 fev. 2015.

LOBATO, L. C. DA S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.** Tese—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 19 maio 2011.

MADIGAN, M. T. et al. **Microbiologia de Brock.** 14. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

MELO, D. DE F. **Estudo da Influência da Quantidade de Lodo na Produção de Biogás em Reator UASB Tratando Esgoto Doméstico.** Dissertação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

METCALF; EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** 5. ed. Porto Alegre: [s.n.].

MIQUELETO, A. P. **Comportamento de Reator Anaeróbio Operado em Batelada Seqüencial, contendo Biomassa Imobilizada e Submetido a Aumento Progressivo da Concentração de Substrato de Fácil Degradação.** Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2003.

MONTEGGIA, L. O. **Proposta de Metodologia para Avaliação do Parâmetro “Atividade Metanogênica Específica”.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...ABES,** 1997.

MOTTERAN, F. **Caracterização da comunidade microbiana de reator anaeróbio de leito fluidificado envolvida na degradação de surfactante não iônico álcool etoxilado de cadeia não ramificada (GENAPOL).** Tese—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2013.

NEITZEL, J. **Potencial de Produção de Biogás da Codigestão Anaeróbia de Resíduos de Frutas e Verduras e Lodo de Esgoto Primário.** Dissertação—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 30 set. 2015.

PAEZ, S. **Estudo da Atividade Metanogênica Específica e Microbiota de Lodo Proveniente de um Reator UASB Instalado na ETE-UFLA Tratando Esgoto Sanitário.** Dissertação—Lavras: Universidade Federal de Lavras, 16 dez. 2019.

PEREIRA, E. R. **Desempenho e Caracterização Microbiana do Processo de Dois Estágios com Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente com Manta de Lodo (UASB) Tratando Águas Residuárias de Suinocultura.** Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2004.

PRAMPERO, J. C. **Fatores Operacionais na Manutenção da Eficiência de um Reator UASB Compartimentado Tratando Esgoto Sanitário.** Dissertação—Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2017.

PROENÇA, A. J. **Potencial de Produção de Biogás através da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos do Restaurante Universitário da UFSC**. Trabalho de Conclusão de Curso—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 16 dez. 2022.

PROJETO ECOANDO SUSTENTABILIDADE (PES). **Nota Técnica N°12/PES/2021**. Florianópolis, 25 nov. 2021.

PROSAB. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

ROCHA, M. A. G. DA et al. **Avaliação e Comparação entre a Atividade Metanogênica Específica de Lodos de Esgotos Doméstico e Industriais**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...ABES**, 2001.

SANTOS, V. **Disposição De Efluentes Tratados em uma Lagoa de Evapoinfiltração**. Dissertação —Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, out. 2018.

SAVI, B. P. **Monitoramento em escala real de vírus entéricos e respiratórios humanos após evento de extravasamento de efluente sanitário na Lagoa da Conceição- Florianópolis/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, dez. 2022.

SGANZERLA, G. S. **Avaliação da Atividade Microbiana Anaeróbia Submetida a Substratos Preferenciais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, nov. 2013.

SILVA, V. E. C. **Análise Espaço Temporal do Estado Trófico de uma Laguna Costeira Subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina**. Dissertação—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, maio 2016.

TUNES, C. R. **Produção de Biogás a Partir da Digestão Anaeróbica de Efluentes Orgânicos em Reator UASB**. Dissertação—Gurupi: Universidade Federal do Tocantins, 2017.

VIEIRA, G. C. **Inibição e Toxicidade no Processo de Digestão Anaeróbia dos Lodos Gerados na ETE Brasília Sul: Estudo m Escala Laboratorial**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, jul. 2017.

VON SPERLING, M. **Basic principles of wastewater treatment**. Londres: IWA Publishing, 2007.

ZUPANČIČ, G. D.; GRILC, V. **Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste**. Em: KUMAR, S. (Ed.). **Management of Organic Waste**. [s.l.] InTech, 2012. p. 3–28.