

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

GUILHERME ANSELMO FLORES

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUO DE LODO ATIVADO PROVENIENTE DO
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

**SÃO LEOPOLDO
2019**

GUILHERME ANSELMO FLORES

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUO DE LODO ATIVADO PROVENIENTE DO
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Luís Alcides Schiavo Miranda

SÃO LEOPOLDO

2019

F634p

Flores, Guilherme Anselmo.

Produção de biogás de resíduo de lodo ativado proveniente do tratamento de esgoto sanitário / por Guilherme Anselmo Flores. -- São Leopoldo, 2019.

79 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Luís Alcides Schiavo Miranda, Escola Politécnica.

1. Engenharia sanitária. 2. Lodo residual. 3. Biodigestores. 4. Biogás. 5. Águas residuais – Purificação – Processo de lodo ativado. 6. Digestão anaeróbia. 7. Esgotos. I. Miranda, Luís Alcides Schiavo. II. Título.

CDU 628.3
628.336
662.767.2

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

GUILHERME ANSELMO FLORES

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE RESÍDUO DE LODO ATIVADO PROVENIENTE DO
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 25 de junho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luís Alcides Schiavo Miranda (Orientador) – UNISINOS

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Caetano – UNISINOS

Prof. Dr. Fernando Fernandes – UEL

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e as oportunidades que vem concedendo a mim.

Ao meu orientador Dr. Luís Alcides Schiavo Miranda pela ajuda prestada a este trabalho, compartilhando todo seu conhecimento e experiência.

Agradeço à minha família por sempre proporcionar apoio nos momentos necessários e compreender os momentos de ausência.

Obrigado aos meus colegas pelos momentos de brincadeiras e companheirismo.

Aos funcionários da Unisinos pelo profissionalismo e auxílio nas atividades de laboratório.

RESUMO

A busca por maior eficiência no tratamento dos efluentes permite criar alternativas para a recuperação dos recursos hídricos, contudo os sistemas utilizados no Brasil tais como reatores anaeróbios e lodos ativados não permitem destinação final. Os resíduos de lodos ativados mantem grande quantidade de matéria orgânica ainda passiva de digestão, este substrato pode alimentar os reatores anaeróbios, favorecendo a redução dos poluentes, gerando alternativa para produção de biogás. Este trabalho busca avaliar o potencial de geração de biogás do resíduo de lodo de um reator de lodos ativados tratando esgoto sanitário. A metodologia utilizada busca comparar o desempenho do reator com a utilização do lodo da estação de tratamento (ETE) de esgoto da Unisinos como inóculo, combinado com resíduo de lodo ativado da ETE São João Navegantes, foram adotadas 3 relações de volume Inóculo/Substrato diferentes, (I/S 1:1, 2:1 e 3:1) equalizadas diretamente pela massa de sólidos voláteis totais (SVT). O estudo verificou a melhor relação para produção com a mais alta taxa de metano no biogás. A temperatura utilizada foi mesofílica de 35°C. Foram monitorados os volumes produzidos, tempo de retenção de sólidos, remoção dos SVT, pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis (AGV). O processo da digestão se manteve estável, desempenhando logo nas primeiras horas, os ensaios levaram entre 216h e 312h, com manutenção do pH em faixa metanogênica. O biogás gerado apresentou taxa de metano com mais de 70%, chegando a 69,72mL/mg.SVT na primeira relação (I/S 1:1) 128,96 mL/mg.SVT na segunda (I/S 2:1) e 130,52 mL.CH₄/mg.SVT na terceira (I/S 3:1). A relação encontrada com melhor desempenho foi a 3:1 permitindo a maior produção de CH₄ para cada mg de SVT ingerida no reator, para efeito comparativo pode-se estimar a capacidade de geração em 130,52m³/t.lodo. Nenhuma das relações apresentou característica fitotóxica para sementes em ensaio de germinação.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia. Produção de biogás. Biodegradação de Resíduo de Lodo. Biodigestor.

ABSTRACT

The looking for greater efficiency in the treatment of effluents allows to create alternatives for the recovery of water resources, however the systems used in Brazil such as anaerobic reactors and activated sludge do not allow final destination. The waste activated sludge keep a large amount of organic matter still passive of digestion, this substrate can feed anaerobic reactors, favoring the reduction of pollutants, generating alternative for biogas production. This work aims to evaluate the biogas generation potential of the sludge residue of an activated sludge reactor treating sewage. The methodology used is to compare reactor performance with the use of Unisinos sewage treatment plant (WWTP) sludge as inoculum, combined with activated sludge residue from the São João Navegantes WWTP. Three different inoculum / substrate volume ratios were adopted. , (I / S 1: 1, 2: 1 and 3: 1) equalized directly by the mass of total volatile solids (SVT). The study found the best ratio for production with the highest methane rate in biogas. The temperature used was mesophilic at 35 ° C. Volumes produced, solids retention time, SVT removal, pH, alkalinity and volatile fatty acids (VFA) were monitored. The digestion process remained stable, performing in the first hours, the tests took between 216h and 312h, with pH maintenance in the methanogenic range. The generated biogas showed a methane rate of over 70%, reaching 69.72mL / mg.SVT in the first ratio (I / S 1: 1) 128.96 mL / mg.SVT in the second (I / S 2: 1) and 130.52 mL.CH₄ / mg.SVT in the third (3: 1 I / O). The ratio with the best performance was 3: 1, allowing the highest CH₄ production for each mg of SVT ingested in the reactor. For comparison, the generation capacity of 130.52m³/t.lodo can be estimated. None of the ratios presented phytotoxic characteristics for seeds in a germination test.

Palavras-chave: Anaerobic digestion. Biogas production. Biodegradation of waste sludge. Biodigestor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço esquemático de DQO nos sistemas de tratamento aeróbio e anaeróbio	23
Figura 2 – Rota metabólica da digestão anaeróbia	27
Figura 3 – Fluxograma	41
Figura 4 – Reatores de bancada utilizados no estudo	42
Figura 5 – Sistema experimental constituído de banho termostático com controle eletrônico de temperatura e reatores anaeróbios	43
Figura 6 – Kit para análise do biogás	44
Figura 7 – Produção de biogás para os ensaios 1, 2 e 3 utilizando relação (I/S 1:1)	49
Figura 8 – Produção total de biogás do reator 1, (I/S 1:1)	50
Figura 9 – Taxa de metano no reator 1 (I/S 1:1)	51
Figura 10 – Concentração de sólidos no reator 1 (I/S 1:1)	52
Figura 11 – Comportamento do pH no reator 1 (I/S 1:1)	53
Figura 12 – Comportamento da alcalinidade no reator 1 (I/S 1:1)	54
Figura 13 – Comportamento do AGV no reator 1 (I/S 1:1)	54
Figura 14 – Produção de biogás no reator 2 (I/S 2:1)	56
Figura 15 – Produção total de biogás do reator 2 (I/S 2:1)	57
Figura 16 – Taxa de metano no reator 2 (I/S 2:1)	58
Figura 17 – Concentração de sólidos no reator 2 (I/S 2:1)	59
Figura 18 – Comportamento do pH no reator 2 (I/S 2:1)	60
Figura 19 – Comportamento da alcalinidade no reator 2 (I/S 2:1)	60
Figura 20 – Comportamento do AGV no reator 2 (I/S 2:1)	61
Figura 21 – Produção de biogás no reator 3 (I/S 3:1)	63
Figura 22 – Produção total de biogás do reator 3 (I/S 3:1)	63
Figura 23 – Taxa de metano no reator 3 (I/S 3:1)	65
Figura 24 – Concentração de sólidos no reator 3 (I/S 3:1)	66
Figura 25 – Comportamento do pH no reator 3 (I/S 3:1)	67
Figura 26 – Comportamento da alcalinidade no reator 3 (I/S 3:1)	67
Figura 27 – Comportamento do AGV no reator 3 (I/S 3:1)	68
Figura 28 – Ensaio de germinação concluído.	71
Figura 29 – Sementes sendo expostas a luz durante ensaio de germinação	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios	24
Quadro 2 – Diferença dos tipos de lodo	33
Quadro 3 – Classes de lodo de esgoto segundo CONAMA 375.....	34
Quadro 4 – Parâmetros físico-químicos analisados na digestão anaeróbia do resíduos de lodo ativado	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reações comuns da degradação anaeróbia	29
Tabela 2 – Eficiências típicas do processo de lodos ativados.....	31
Tabela 3 – Poder calorífico de alguns gases	37
Tabela 4 – Sistemas de aproveitamento de energia a partir do biogás.....	37
Tabela 5 – Teste de germinação de alface	45
Tabela 6 – Características do inóculo e substrato.....	47
Tabela 7 – Concentrações de substrato e inóculo do reator 1 (I/S 1:1)	48
Tabela 8 – Produção de biogás no Reator 1	49
Tabela 9 – Produção de CH ₄ no reator 1 (I/S 1:1).....	51
Tabela 10 – Remoção de SVT no reator 1 (I/S 1:1)	52
Tabela 11 – Concentrações de substrato e inóculo em cada reator do ensaio 2.....	55
Tabela 12 – Produção de biogás no Reator 2 (I/S 2:1)	56
Tabela 13 – Produção de CH ₄ no reator 2 (I/S 2:1).....	58
Tabela 14 – Remoção de SVT no reator 2 (I/S 2:1)	59
Tabela 15 – Concentrações de substrato e inóculo em cada reator do ensaio 3.....	62
Tabela 16 – Produção de biogás no Reator 3 (I/S 3:1)	64
Tabela 17 – Produção de CH ₄ no reator 3 (I/S 3:1).....	64
Tabela 18 – Remoção de SVT no reator 3 (I/S 3:1)	66
Tabela 19 – Produção de biogás nos reatores.....	68
Tabela 20 – Resultados de nitrogênio e fósforo nos reatores no tempo final.....	70
Tabela 21 – Resultado do ensaio de germinação dos reatores	72

LISTA DE SIGLAS

%	Percentual
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
APHA	American Public health Association
C°	Celsius
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
H	Horas
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
NA	Nitrogênio Amoniacal
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NT	Nitrogênio Total
pH	Potencial Hidrogeniônico
PT	Fósforo Total
SVT	Sólidos Voláteis Totais
ST	Sólidos Totais
T	Temperatura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo Geral	22
1.4.2 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Digestão anaeróbia	23
2.2 Etapas da digestão	25
2.3 Partida do reator	29
2.4 Digestão de lodos	30
2.4.1 Lodos ativados	31
2.4.2 Digestão anaeróbia dos lodos	32
2.5 Biogás	35
2.5.1 Cálculo de geração do Biogás	36
2.5.2 Fatores ambientais	37
3 METODOLOGIA	41
3.1 Inóculo e lodo	41
3.2 Sistema experimental	42
3.3 Monitoramento do sistema	43
3.4 Potencial agronômico	45
4 RESULTADOS	47
4.1 Reator 1	48
4.1.1 Produção do biogás	48
4.1.2 Teor de CH ₄	50
4.1.3 Remoção de SVT	51
4.1.4 pH	52
4.1.5 Alcalinidade	53
4.1.6 AGV	54
4.2 Reator 2	55
4.2.1 Produção do biogás	55
4.2.2 Teor de CH ₄	57
4.2.3 Remoção de SVT	58
4.2.4 pH	59

4.2.5 Alcalinidade	60
4.2.6 AGV	61
4.3 Reator 3	61
4.3.1 Produção do biogás	62
4.2.2 Teor de CH ₄	64
4.2.3 Remoção de SVT	65
4.2.4 pH	66
4.2.5 Alcalinidade	67
4.2.6 AGV	68
4.4 Considerações	68
4.5 Potencial agrônômico	69
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo reaproveitamento e o avanço das tecnologias, permitem estudos que visam encontrar alternativas para descontaminação dos efluentes, investindo em soluções para redução e mitigação destes impactos.

O sistema de lodos ativados presente por todo o Brasil, atua como ferramenta para remoção dos poluentes nas estações de tratamento de efluentes, este sistema proporciona ótima eficiência para redução da carga orgânica e nitrogênio, além de necessitar de pouca área para operação, ajudando a logística dos centros urbanos ou locais que carecem de espaço.

Apesar de conseguir atingir níveis de qualidade permissíveis ao lançamento do efluente tratado diretamente no meio ambiente, o sistema necessita do expurgo dos resíduos de lodo gerado, este material por sua vez demanda de beneficiamento para disposição final.

Entre nas alternativas de tratamento existe o sistema de digestão anaeróbia, permitindo realizar a descontaminação de parte do efluente, gerando subprodutos como biogás e lodo digerido.

O sistema de tratamento por reator anaeróbio depende de uma série de fatores que em conjunto resultam no equilíbrio do sistema, deste modo efetuar a digestão demanda do acompanhamento dos níveis de pH, alcalinidade, acidez e temperatura, além do balanço entre substrato inóculo.

Diversos materiais podem ser utilizados como substrato, porém alguns nutrientes podem favorecer o funcionamento do sistema, gerando maior estabilização da matéria orgânica, ampliando significativamente o desempenho do reator.

Avaliar o sistema de tratamento anaeróbio está relacionado com a capacidade de gerenciar a adaptação entre a biomassa e o substrato e tomar as decisões, contudo estes reatores podem trabalhar com faixas de pH e temperatura que favoreçam a geração de biogás com maior teor de metano.

À medida que os nutrientes presentes no meio favoreçam seu funcionamento, os níveis de eficiência podem aumentar significativamente, reatores anaeróbios se beneficiam da matéria orgânica em forma de lodo ou efluente.

Entre os gases da digestão anaeróbia pode-se salientar o metano (CH_4), este biogás presente na decomposição da matéria atua como combustível para diversas

finalidades, além da geração em forma de calor. Direcionar estes gases para uma destinação final reduz sua capacidade poluidora, tendo em vista que o CH₄ é altamente prejudicial para a atmosfera, capturando 20x mais a radiação infravermelha se comparado ao CO₂.

Trabalhar combinando tipos de tratamentos dentro de uma ETE é comum, a possibilidade de poder conciliar métodos buscando entregar maior eficiência dentro da digestão anaeróbia fez despertar a ideia deste trabalho.

Este estudo surgiu como alternativa a geração de biogás, utilizando o sistema de reatores anaeróbios com temperatura mesofílica, e pH em faixa metanogênica, atuando como alternativa de substrato o resíduo de lodo ativado, a iniciativa buscou encontrar a relação ideal entre inóculo e substrato para a melhor geração de biogás e metano.

O projeto procurou trazer uma solução para a utilização deste resíduo de lodo, gerando energia e tornando uma opção para reduzir os volumes do rejeito destes lodos, além de avaliar a toxicidade do digestato.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de geração de biogás do resíduo de lodo de um reator de lodos ativados tratando esgoto sanitário.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar entre as relações estudadas a relação inóculo/substrato ideal para digestão anaeróbia do resíduo de lodo ativado (1:1; 2:1; 3:1);
- b) Estabelecer uma relação de carga orgânica com base em SVT ideal para partida do reator;
- c) Verificar o potencial de produção de biogás e o teor de CH₄;
- d) Avaliar o índice de germinação do digestato.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresentará a pesquisa bibliográfica que foi realizada sobre o tema, ela servirá de instrumento para entendimento do assunto e desenvolvimento do presente trabalho.

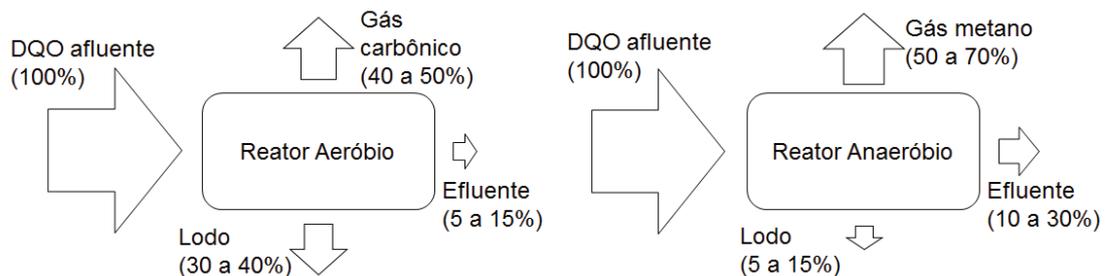
2.1 Digestão anaeróbia

O termo digestão é utilizado no tratamento de efluentes se referindo ao processo de estabilização da matéria orgânica, obtida através da atividade de uma população de bactérias condicionadas no lodo, em condições que permitam sua proliferação. Este pode ser dividido entre processos anaeróbios e aeróbios, os quais podem ser utilizados separadamente ou em conjunto (Jordão e Pessôa, 2005).

A digestão anaeróbia é conhecida pelos Engenheiros desde o século 19, sendo caracterizada pela estabilização da matéria orgânica em um ambiente com ausência de oxigênio molecular, devida a sua eficiência e robustez ela se faz presente desde simples tratamentos residenciais, como também responsável por tratamento em estações automatizadas servindo diversas regiões, e comumente utilizados no tratamento de excesso de lodos (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007).

Em sistemas aeróbios, cerca de 40 a 50% da degradação biológica se converte em gás carbônico seguidos de 30 a 40% que incorporam a matéria orgânica como biomassa microbiana gerando o lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás ou sedimentado para o lodo, deixa o reator como material não degradado com 5 a 15%, conforme figura 1 a seguir apresenta o balanço esquemático de DQO para processos aeróbios e anaeróbios (Chernicharo, 2007).

Figura 1 – Balanço esquemático de DQO nos sistemas de tratamento aeróbio e anaeróbio



Fonte: Chernicharo, 2007

Já, ainda conforme Chernicharo (2007), o processo anaeróbio possui maior conversão de matéria orgânica do afluente, sendo de 50 a 70% o teor de metano, resultando em uma pequena quantidade convertida em biomassa microbiana de 5 a 15% e 10 a 30% segue no efluente.

Via de regra, todos os compostos orgânicos possuem o potencial de degradação por meio anaeróbio, de tal forma que quanto maior sua biodegradabilidade, mais eficiente e econômico será este processo. (Bertoldi; Vallini; Pera, 1983)

A nível mundial os reatores utilizados no tratamento não operam somente no tratamento de efluentes, mas podem digerir lodos de primeiro ou segundo estágio, e demais resíduos sólidos. (Parkin e Owen, 1986)

Locais com temperaturas acima dos 20°C favorecem o funcionamento do sistema, tendo em vista que a ferramenta é dotada de baixo custo de implantação e manutenção, possuindo simplicidade na sua operação, reduzida produção de sólidos, alta capacidade de digestão da matéria orgânica, outras vantagens podem ser identificadas na Quadro 1. (McCarty, 1964)

Quadro 1 – Principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Anaeróbio	Baixa produção de sólidos, cerca de 2 a 8 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios;	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória;
	Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos;	Produção de efluente com aspecto desagradável e usualmente com qualidade insuficiente para atender os padrões ambientais. Em decorrência, alguma forma de pós-tratamento é normalmente necessária;
	Baixa demanda de área	Possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica, presença de compostos tóxicos ou ausência de nutrientes;
	Baixos custos de implantação, da ordem de 20 a 30 dólares per capita	
	Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas;
	Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses;	A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado;
	Tolerância a elevadas cargas orgânicas;	Possibilidade de geração de maus odores e de problemas de corrosão, porém controláveis.
	Aplicabilidade em pequena e grande escala;	
	Baixo consumo de nutrientes.	

Fonte: Chernicharo, 2007

2.2 Etapas da digestão anaeróbia

Em ambientes anaeróbios onde ocorre a oxidação da matéria orgânica, apresenta-se os processos metabólicos de fermentação, na ausência de um aceptor final de elétrons, e na respiração que utiliza aceptores de elétron inorgânicos (NO_3^- , SO_4^- ou CO_2). A formação de metano preferencialmente ocorre onde a oferta de oxigênio, nitrato e sulfato não estejam disponíveis como aceptoras de elétrons, devido a matéria orgânica ser oxidada por meio aeróbio na presença destes compostos. (Chernicharo,2007)

A digestão anaeróbia pode ser classificada como um meio onde múltiplos grupos de microrganismos trabalham juntos na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, gás sulfídrico, água e amônia, além de gerarem novas células bacterianas, por mais que o processo possa ser considerado de maneira simplificada em fase acidogênica e metanogênica, este é dividido em várias trajetórias metabólicas, integrando diversos tipos microbianos, cada qual com seu respectivo comportamento fisiológico. (McCarty, 1964; Metcalf e Eddy, 2016)

A digestão anaeróbia representa um sistema ecológico devidamente controlado, contendo processos metabólicos complexos, ocorrendo-os em sequência sendo um processo de múltiplos estágios capaz de caracterizar diferentes formas de matéria orgânica, sendo encontrada em três etapas, contendo uma etapa intermediária extra, chamada acetogênese ocorre em alguns dos AGV produzidos por acidogênese: (Parkin e Owen,1986; Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007; e Metcalf e Eddy, 2016)

- a) Hidrólise – etapa básica onde o material particulado é convertido por Enzimas quebrando compostos orgânicos complexos (celulose, proteínas e lipídios) transformando em compostos solúveis, que futuramente podem ser hidrolisados a monômeros simples (ácidos graxos, álcoois, dióxido de carbono e amônia). Sendo encontradas nestes processos as seguintes bactérias, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *anaerovibrio lipolytica*, *Clostridium proteolyticum*, *Eubacterium* e *Peptococcus anaerobicus*;
- b) Acidogênese – segunda etapa básica que é efetuada por bactérias, convertem os subprodutos do primeiro estágio em ácido acético, propiônico, hidrogênio, dióxido de carbono, além de outros com baixo peso molecular, neste processo de fermentação os substratos servem tanto como doadores e

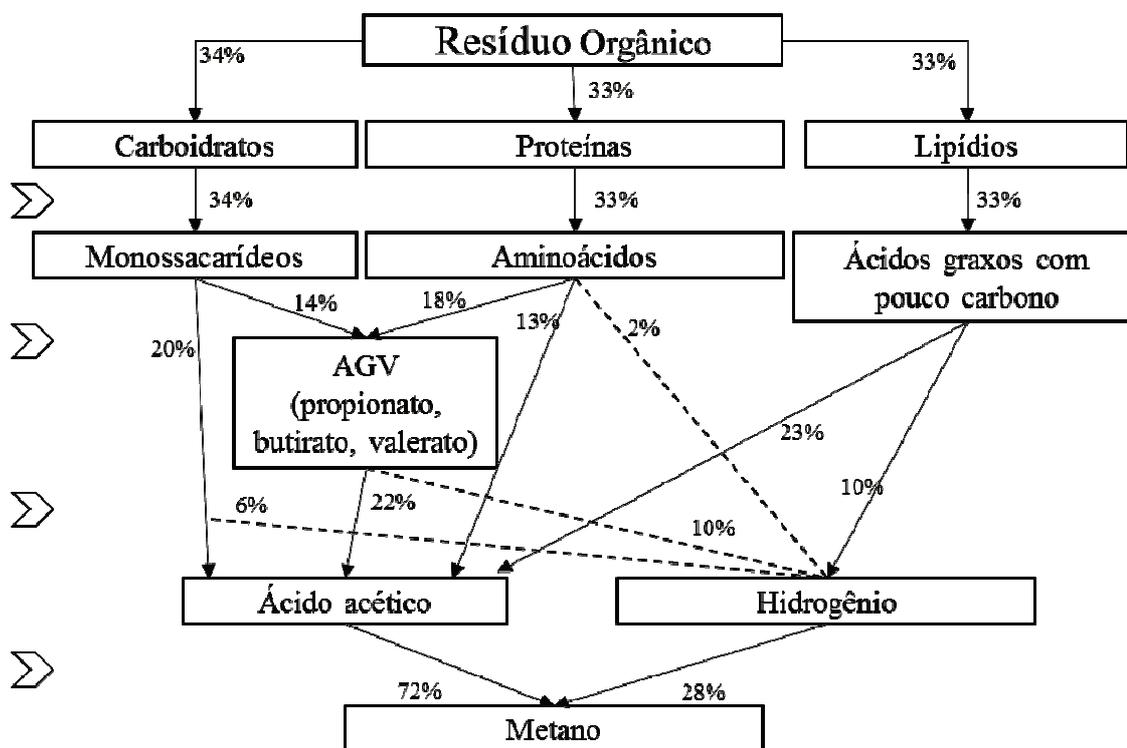
receptores de elétrons, estes produtos metabólicos são importantes substratos para as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas. Dentre os gêneros de bactérias mais comuns encontrados são *Cloristridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Etreptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia*;

- c) Acetogênese – refere-se à continuidade da conversão de produtos intermediários em acidogênese, bem como a produção de acetato, CO₂ e hidrogênio os quais são precursores da formação do metano. A mudança da energia livre associada a conversão do propionato e butirato a acetato e hidrogênio requer que a concentração de hidrogênio no sistema seja baixa ($H_2 < 10^{-4}$ atm), ou a reação não ocorrerá, sendo a maior parte do hidrogênio produzido oriundo da oxidação de AGCL e de AGV intermediários ao ácido acético, sendo referida como oxidação anaeróbia. Os gêneros conhecidos de bactérias são *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas*;
- d) Metanogênese – terceira etapa básica é conduzida por dois grupos de bactérias que surgem e conseguem fazer a transformação em metano, a produção do metano ocorre através do dióxido de carbono e hidrogênio; sendo a conversão de acetatos em metano e bicarbonatos.

Como demonstra o fluxograma na figura 2, a digestão anaeróbia é um ecossistema onde grupos de microrganismos trabalham interagindo entre si, na conversão da matéria orgânica complexa em metano, CO₂, H₂O, gás sulfídrico e amônia, além de outras novas células bacterianas. (Parkin e Owen, 1986; Metcalf e Eddy, 2016)

Existe uma quinta fase indesejada, porém possível de ocorrer, a Sulfetogênese, conforme as características do efluente apresentem compostos de enxofre e condições favoráveis à sua produção. Segundo McCarty (1964), a geração dos sulfetos ocorre quando os sulfatos e outros compostos baseados no enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação da matéria orgânica, este processo reduz sulfato, sulfito, e outros compostos sulfurados a sulfeto, por meio da ação de bactérias anaeróbias, chamadas de redutoras de sulfato ou sulforedutoras.

Figura 2 – Rota metabólica da digestão anaeróbia



Adaptado de Metcalf e Eddy, 2016

As bactérias responsáveis por este processo fazem parte de um grupo versátil de microrganismos, capazes de utilizar ampla gama de substratos, incluindo toda a cadeia de ácidos orgânicos voláteis, diversos ácidos aromáticos, hidrogênio, metanol, etanol, glicerol, açúcares, aminoácidos, e outros compostos fenólicos, estes dois grandes grupos podem ser separados em: (Chernicharo,2007)

- bactérias que oxidam seus substratos de forma incompleta, gerando o acetato, pertencendo ao grupo os gêneros *desulfobulbus*, *desulfomonas*. E a maioria das espécies do gênero *desulfotomaculum*, *desulfovibrio*;
- bactérias que conseguem oxidar seus substratos de forma completa do acetato até o gás carbônico, pertencendo ao grupo os gêneros *Desulfobacter*, *desulfococcus*, *desulfosarcina*, *desulfobacterium* e *desulfonema*.

A presença do sulfato no meio anaeróbio permite a possibilidade de uma rota alternativa sendo diferente do apresentado na figura 2, os sulfatos provocam uma competição por substratos disponíveis entre bactérias redutoras de sulfato com as bactérias fermentativas, acetogênicas e archeas metanogênicas. (Nuvolari, 2011)

Chernicharo (2007), relata que a eficiência da remoção de DQO na fase líquida da Sulfetogênese pode ser considerada superior à da metanogênese, mas sem haver a produção de metano, a qual gera conteúdo energético possível de ser aproveitado, entretanto a formação de sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico pode ocasionar em problemas de toxicidade no meio, assim como geração de maus odores, além de que, se por ação bacteriológica houver a presença de oxigênio poderá transformá-lo em ácido sulfúrico, o que traria problemas com corrosão. (Jordão e Pessôa, 2005)

Embora existam poucas espécies metanogênicas capazes de formar metano partindo do acetato, as bactérias metanogênicas acetoclásticas normalmente são predominantes no processo da digestão anaeróbia, respondendo por cerca de 60% a 70% da produção total de metano. (Parkin e Owen, 1986)

Apesar de as bactérias acetoclásticas serem as mais importantes do consórcio microbiano sendo a redução da DQO da fase líquida dependente da conversão do acetato, estes microrganismos possuem crescimento lento e tempo de geração entre 2 e 3 dias, em contrapartida a formação do metano (cerca de 30%), também pode ser obtida por meio das hidrogenotróficas, as quais possuem crescimento rápido e tempo de geração na ordem de 6 horas. (Aquino e Chernicharo, 2005)

As bactérias metanogênicas hidrogenotróficas, ao contrário das acetoclásticas podem ser consideradas como capazes de produzir metano partindo do hidrogênio e gás carbônico, ocasionando uma maior oferta de energia. Encontram-se com maior frequência isoladas os gêneros *methanobacterium*, *methanospirillum* e *methanobevibacter*. (Chernicharo, 2007)

Independente do grupo de bactérias metanogênicas presente no meio, ambos possuem papéis fundamentais para o correto funcionamento do sistema de digestão anaeróbia e geração do metano, sendo as hidrogenotróficas importantes na manutenção dos níveis de pH, consumindo os hidrogênios das fases anteriores, facilitando a degradação do propionato e butirato. (McCarty, 1964; Metcalf e Eddy, 2016)

Microrganismos acidogênicos são os que obtém melhor aproveitamento energético, conseqüentemente, detêm baixo tempo de geração (30 minutos), e as maiores taxas de crescimento da colônia microbiana. Analisando as reações acetogênicas verifica-se que elas não termodinamicamente favoráveis as condições

padrão ($\Delta G' > 0$), porém, graças a interação de microrganismos acetogênicos e metanogênicos elas acontecem naturalmente nos reatores anaeróbios. A conversão de propionato no meio metanogênico é termodinamicamente favorável, porém, resulta em baixa concentração de propionato, o qual, deverá ser dividida entre as espécies envolvidas, microrganismos acetogênicos, metanogênicos acetoclásticos e metanogênicos hidrogenotrófico, explicando a pequena taxa de proliferação desses microrganismos. Pode-se verificar estas reações na Tabela 1. (Chernicharo, 2007)

Tabela 1 – Reações comuns da degradação anaeróbia

Etapa	Reação	$\Delta G'$ (Kj/reação)
Acidogênese	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O > 2CH_3COO^- + 2CO_2 + 2H^+ + 4H_2$ Glicose > Acetato	- 206
	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 > 2CH_3CH_2COO^- + 2CO_2 + 2H^+$ Glicose > Propionato	-358
	$C_6H_{12}O_6 > CH_3CH_2CH_2COO^- + 2CO_2 + H^+ + 2H_2$ Glicose > Butirato	-255
Acetogênese	$CH_3CH_2COO^- + 3H_2O > CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3H_2$ Propionato > Acetato	+76,1
	$CH_3CH_2COO^- + 2HCO_3^- > CH_3COO^- + H^+ + 3HCOO^-$ Propionato > Acetato	+72,2
	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O > 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$ Butirato > Acetato	+48,1
Metanogênese	$CH_3COO^- + H_2O > CH_4 + HCO_3^-$ Acetato > Metano	-31
	$H_2 + \frac{1}{4}HCO_3^- + \frac{1}{4}H^+ > \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}H_2O$ Hidrogênio > Metano	-33,9
	$HCOO^- + \frac{1}{4}H_2O + \frac{1}{4}H^+ > \frac{1}{4}CH_4 + \frac{3}{4}HCO_3^-$ Formiato > Metano	-32,6
	$CH_3CH_2COO^- + 1,75H_2O > 1,75CH_4 + 1,25HCO_3^- + 0,25 H^+$ Propionato > Metano	-56,6

Fonte: Chernicharo, 2007

Em um reator operando de forma que a pressão parcial do H_2 se mantenha abaixo de 10^{-4} atm, ele tende a ser consumido rapidamente, desta forma libera-se energia livre para o meio, facilitando a conversão de ácidos voláteis a acetato e hidrogênio. (Sant'Anna Jr, 2010)

2.3 Partida do reator

Segundo Parkin e Owen (1986), o equilíbrio de nutrientes dentro do reator é fator principal para o controle da proliferação bacteriana e aumento da

decomposição da matéria orgânica, sendo os principais nutrientes Nitrogênio, Enxofre e Fósforo, trabalhando em conjunto com Ferro, Cobalto e Níquel (micronutrientes), assim como Riboflavina e Vitamina B12.

O processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica consiste entre microrganismos acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos, sendo o equilíbrio destes averiguado através dos AGV's produzidos, sabendo que os ácidos são os principais substratos e produtos dos microrganismos que participam desta etapa. (Hobbs *et al.*, 2018)

A população de bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas devem estar presentes em condições adequadas junto das condições ambientais no interior do sistema, desta forma elas utilizarão os ácidos intermediários na mesma proporção em que são formados, conseqüentemente não haverá acúmulo de ácidos assim, não extrapolará a capacidade neutralizadora de alcalinidade naturalmente presente no meio, com o pH permanecendo em faixa favorável às metanogênicas e o sistema é considerado em equilíbrio. (Maragkakia *et al.*, 2018)

Porém se as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas não estiverem presentes em quantidade suficiente, ou expostas a condições ambientais desfavoráveis, não conseguirão consumir os ácidos na mesma proporção que são gerados e conseqüentemente haverá um consumo da alcalinidade por meio destes ácidos livres, rebaixando o pH para condições não favoráveis às atividades metanogênicas e o torna ineficiente. (Parkin e Owen, 1986; Metcalf e Eddy, 2016)

2.4 Digestão de lodos

O termo lodo vem sendo utilizado para designar os subprodutos sólidos dos tratamentos de águas e esgotos, sendo nos processos biológicos de tratamento parte da matéria orgânica absorvida é convertida fazendo parte da biomassa microbiana, podendo ser intitulada como lodo biológico ou secundário, composto essencialmente por sólidos biológicos, ou comumente chamado de biossólido. (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007)

2.4.1 Lodos ativados

Segundo Jordão e Pessôa (2005), este processo se originou na Inglaterra em 1913, onde permaneceu inalterado por cerca de 30 anos, após surgirem os avanços tecnológicos que foi possível realizar pesquisas objetivas e eficientes, que permitiram suas modificações.

Este sistema é amplamente utilizado a nível mundial para quem busca tratar despejos domésticos e industriais, ofertando uma elevada qualidade no efluente e baixo requisitos de área. (Parkin e Owen,1986)

Lodos ativados utiliza-se de processos biológicos no tratamento, ocorrendo reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e, em algumas condições, matéria nitrogenada presente no esgoto bruto, sendo assim, o seu tanque de aeração contém uma grande quantidade de flocos microbianos em suspensão no meio líquido, buscando consumir a maior quantidade de poluentes, observa-se na tabela 2. (Sant'Anna Jr, 2010)

Tabela 2 – Eficiências típicas do processo de lodos ativados

Característica	DBO	SS
Efluente típico, mg/l	20 – 30	20 – 30
Remoção típica, %	85 – 95	85 – 95

Fonte: Jordão e Pessôa, 2005

SS: Sólidos Suspensos

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

Os lodos após misturados, agitados e aerados seus sólidos seguem em conjunto com efluente onde serão separados em decantadores por meio da sedimentação, estes então serão recirculados no final do sistema de decantação para a unidade de aeração por bombeamento, pois também existe uma quantidade considerável de bactérias ainda ativas e ávidas após a saída do reator, permitindo separar a biomassa no decantador secundário devido a sua propriedade de flocular, pois sua matriz gelatinosa permita a aglutinação das bactérias. (Metcalf e Eddy, 2016)

Conforme Von Sperling (2005), o sistema de lodos ativados pode ser basicamente dividido em fluxo contínuo, onde o efluente está sempre entrando e saindo do reator e sua variante com operação de fluxo intermitente:

- a) aeração prolongada diferente dos lodos ativados convencionais o qual a biomassa permanece no sistema por 4 a 10 dias e após este período requer estabilização do seu lodo devido ao elevado teor de matéria orgânica na composição de suas células, este processo consiste em permanecer com a biomassa no sistema por um período maior sendo na ordem de 20 a 30 dias para que as bactérias passem a utilizar nos processos metabólicos a própria matéria orgânica componente de suas células e conseqüentemente estabilizem a biomassa;
- b) fluxo intermitente consiste na incorporação de todas as unidades de processos e operações em um único só tanque pois quando os aeradores estão desligados os sólidos sedimentam etapa onde se retira o efluente, ao religar os aeradores seus sólidos sedimentados retornam à massa líquida, dispensando as elevatórias de recirculação.

O sistema de Lodos Ativados seja por fluxo contínuo ou intermitente apresenta algumas situações favoráveis e outras contrárias à sua aplicação, conforme Jordão e Pessôa (2005), pode-se salientar entre as vantagens:

- a) maior eficiência no tratamento;
- b) maior flexibilidade de operação; e
- c) menor área ocupada em relação a filtração biológica.

Entre as desvantagens:

- a) operação delicada;
- b) necessidade de controle completo em laboratório; e
- c) custo mais elevado em relação a filtração biológica.

2.4.2 Digestão anaeróbia dos lodos

A degradação de substratos complexos como os encontrados em lodos das ETE's, possuem o ácido acético como precursor de aproximadamente 72% do metano formado, juntamente com o ácido propiônico com 95% da produção total do

metano, os 15% restantes são resultantes da degradação de outros ácidos como fórmico e o butírico. (Chernicharo, 2007)

Em geral o biogás consiste em 50 a 75% de CH₄ e 25 a 50% de CO₂, porém a composição destas parcelas varia de acordo com o material a ser digerido. (Parra-orobio *et al.*, 2018)

Buscando a redução do volume de digestão a ser feito, o adensamento do lodo é indicado para que seja possível encontrar uma concentração adequada de sólidos na alimentação do reator. (Bertoldi; Vallini; Pera, 1983)

Andreoli; Von Sperling; Fernandes, (2007), relatam valores entre 4 e 8% como os mais indicados, mencionando uma eficiência reduzida nos valores inferiores a 2,5%. Os mesmos alertam quanto a sensibilidade das bactérias anaeróbias, que podem comprometer a eficiência do processo de digestão.

Sabendo que independentemente do tipo de lodo, seja ele primário ou secundário, mesmo que, provenientes de um sistema devidamente balanceado, operado em sua faixa ideal, deverá passar por um tratamento adicional para a mineralização da matéria orgânica presente no meio, antes de sua destinação final. (Parkin e Owen, 1986)

Objetivando a redução de custos com armazenagem e transportes pode ser feita a secagem dos lodos por meio de: Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2007)

- a) gravidade;
- b) flotação;
- c) centrífugas;
- d) prensas.

Digestores anaeróbios apresentam como uma vantagem a estabilização dos lodos gerados nas ETE's, ajudando na redução do seu custo, no quadro 2, pode-se verificar as diferenças entre os tipos lodos.

Quadro 2 – Diferença dos tipos de lodo

Lodo bruto	Lodo digerido
Matéria orgânica instável	Matéria orgânica estabilizada
Elevada fração biodegradável na matéria orgânica	Baixa produção de fração biodegradável
Alto potencial para geração de odores	Baixo potencial para geração de odores
Elevada concentração de patógenos	Concentração de patógenos inferior ao do lodo bruto

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2007

Estes lodos já estabilizados podem ser destinados a diversos fins podendo relacionar alguns: (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007)

- a) aterros sanitários;
- b) incineração;
- c) uso agrícolas;
- d) recuperação de área degradada.

Em qualquer uma das hipóteses, deverá ser feita o estudo técnico e proceder conforme as legislações ambientais, a CONAMA 375/2006 em suas disposições, define os parâmetros a serem seguidos para a destinação agrícola, determinando a classe do material de acordo com os requisitos de coliformes, bactérias e vírus, podendo ser verificado no quadro 3.

Quadro 3 – Classes de lodo de esgoto segundo CONAMA 375

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes < 0,25 ovo / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST
	Salmonella ausência em 10 g de ST
	Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

Fonte: CONAMA 375, 2006

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

Na referida lei, o Art. 3º faz menção a esta redução de patógenos e atratividade de vetores, determinando em seu Anexo I os níveis necessários a serem atendidos, em seus critérios exclui qualquer tipo de utilização agrícola os seguintes lodos:

- a) lodo de estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares;
- b) lodo de estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos;
- c) resíduos de gradeamento;
- d) resíduos de desarenador;
- e) material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbicos;
- f) lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto;
- g) lodo de esgoto não estabilizado;
- h) lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes.

A própria resolução sugere a digestão anaeróbia com temperatura mesofílica e termofílica (35 a 55°C), durante período de 15 dias como processo de redução significativa de patógenos.

2.5 Biogás

Reatores anaeróbios produzem gás, dos quais são oriundos do processo de decomposição da matéria orgânica, gerando em sua maior parte metano e gás carbônico durante sua reação, devido à baixa solubilidade o metano tende a se desprender das partículas de água, sendo facilmente captado no topo do reator, diferente do gás carbônico que segue junto com a superfície da água. (McCarty, 1969; Metcalf e Eddy; 2016)

Estes gases ao invés de serem lançados diretamente na atmosfera podem ser queimados ou até mesmo aproveitados como geração de energia, sua viabilidade deve considerar além do aspecto relacionado a redução do “efeito estufa”, atentando diretamente na equivalência energética entre ele e o material que está substituindo. (Maragkakia *et al.*, 2018).

2.5.1 Cálculo de geração do Biogás

Segundo Chernicharo (2007), é possível estimar a produção de Biogás em um reator, conforme demonstram as equações 1, 2, 3 e 4.

Parcela de DQO convertida em gás metano, equação 1.

$$DQO_{CH_4} = Q \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q \times S_0 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

DQO_{CH_4} : carga de DQO convertida em metano (kgDQO $_{CH_4}$ /d);

Q: vazão do esgoto afluente (m³/d);

S_0 : concentração de DQO afluente (kgDQO/m³);

S: concentração de DQO efluente (kgDQO/m³);

Y_{obs} : coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 kgDQO_{lodo}/kgDQO_{apl}).

Conversão da massa de metano equação 2.

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q_{CH_4} : produção volumétrica de metano (m³/d);

f(T): fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO/m³).

Fator de correção para temperatura operacional do reator equação 3.

$$f(T) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273 + T)} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

P: pressão atmosférica (1 atm);

K_{DQO} : DQO correspondente a um mol de CH₄ (64 gDQO/mol);

R: constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.k);

T: temperatura operacional do reator (°C).

Uma vez obtida a produção teórica de metano, podemos estimar a produção total do biogás, conforme equação 4.

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Q_{\text{biogás}}$: produção volumétrica de biogás (m^3/d);

Q_{CH_4} : produção volumétrica de metano (m^3/d);

C_{CH_4} : concentração de metano no biogás.

Desta forma o autor demonstra como quantificar a possível quantidade de geração do biogás e desta forma, torna possível vislumbrar o aproveitamento deste nos processos industriais, conforme tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Poder calorífico de alguns gases

Gás	Poder calorífico (kJ/kg)
Propano comercial	45.800
Butano comercial	44.600
Gás natural	37.300
Metano	35.800
Gás da digestão (65 % metano)	22.400

Fonte: Jordão e Pessôa, 2014

Tabela 4 – Sistemas de aproveitamento de energia a partir do biogás

Aproveitamento	Pré-tratamento	Eficiência térmica	Eficiência elétrica
Caldeiras	Nenhum	75 a 80%	-
Energia mecânica	U,H,S	~ 46%	26 a 28%
Cogeração elétr./térm	U,H,S	45 a 50%	30 a 35%
Microturbinas	U,S	35 a 40%	24 a 28%
Células combustíveis	U,H	~37%	~ 40%

U = remoção da umidade; H = remoção de H_2S ; S = remoção de siloxanos

Fonte: Jordão e Pessôa, 2014

2.5.2 Fatores ambientais que interferem na produção de biogás

Para manter o equilíbrio entre a biomassa e o substrato a ser digerido é necessário acompanhar certos níveis para que torne possível a correta execução do

processo de digestão anaeróbia, interferindo diretamente na qualidade e quantidade de biogás produzido, sendo eles referenciados a seguir.

Os processos de digestão podem ser distinguidos entre os que ocorrem em meio mesofílico com temperatura entre 20 e 40°C e os termofílicos com temperatura acima de 50°C. Cada um deles fornece ao meio um tipo de atividade biológica dos microrganismos que envolvem o processo. (Ho *et. al*, 2013)

O tratamento termofílico é possível utilizar cargas mais altas devido a sua maior taxa de degradação da matéria orgânica, também pode-se obter uma maior produtividade de biogás devida a aceleração deste processo. Tratando do sistema mesofílico pode-se citar como benefícios a maior estabilidade do sistema, que tende a sofrer menos com acidificação, já que suas reações são mais lentas, é possível ajustar o sistema, assim como o lodo que apresenta melhor índice de descontaminação. (Parkin e Owen,1986; Appels *et. al*, 2008)

Existem trabalhos que utilizaram a combinação dos sistemas buscaram encontrar um equilíbrio entre os benefícios do sistema. Segundo Ge *et al*. (2011) que estudaram a combinação avaliada a um sistema de pré tratamento termofílico seguido por segunda fase Mesofílica provou uma notável melhora no desempenho geral do sistema, quando combinados entre 50 a 60°C, obtendo melhor produção de CH₄ e destruição de Sólidos Voláteis.

O pH é um parâmetro para a avaliação das atividades que estão ocorrendo dentro do reator e com ele é possível observar as atividades das enzimas, sabendo que pode inativar a atividade anaeróbia se os valores não se encontrarem dentro das faixas ideais, sabendo que as bactérias metanogênicas são mais sensíveis a mudanças. (Lettinga, 1995; Hobbs *et al.*, 2018)

Os microrganismos responsáveis pela produção de metano se proliferam em faixa mais estreita que a própria digestão anaeróbia que é de 6,6 a 7,6. (Parkin e Owen, 1986; Parra-orobioa *et al.*, 2018)

Latif *et al*. (2017) em seu estudo verificou que a produção de metano entre valores distintos de pH e constatou que a produção tende a ser maior quando se encontra em faixa próxima a 7,0.

Substratos aeróbios obtidos após passar por centrífuga e acondicionado, podem obter uma redução nos valores do pH devido ao tempo que se mantiveram armazenados, segundo Bertoldi, Vallini, Pera (1983), a atividade microbiana ocorrida

no processo de decomposição acarretou na quebra de material orgânico complexo resultando na liberação de ácidos orgânicos, subsidiando a quedas no pH.

Contudo não se pode avaliar o funcionamento da digestão anaeróbia apenas pelo resultado do pH, pois a alcalinidade e acidez são parâmetros que apresentam maior consistência. (Maragkakia *et al.*, 2018)

Conforme o funcionamento da digestão anaeróbia os parâmetros de Alcalinidade e Acidez apresentam-se diferentes, a redução de valores no pH está relacionada diretamente a este parâmetro, desta forma se o balanço entre biomassa e substrato estiver errado ocorrerá um colapso no sistema fazendo com que a alcalinidade seja consumida pelos AGV presentes no sistema derrubando o pH até acontecer a interrupção da decomposição, em outro lado, com o ajuste ideal entre esta relação os ácidos serão convertidos pelas bactérias metanogênicas, aumentando a alcalinidade do meio e conseqüentemente elevando os valores no reator. (Appels *et. al*, 2008; Wang *et. al*, 2013)

Fator importante na análise da digestão os ácidos graxos voláteis, estão relacionados diretamente à alcalinidade/acidez e ao pH, pois altas taxas de ácidos demonstram o desequilíbrio cinético ocorrendo dentro do sistema, entre as bactérias participantes do consórcio metanogênico. (Guan *et. al*, 2017)

O funcionamento ideal do sistema dá-se quando a velocidade de consumo da matéria orgânica é maior do que a quantidade introduzida no reator, desta forma em digestores que operam por batelada é possível observar a diminuição dos AGV's ao longo do tempo, sendo possível identificar se o sistema está funcionando de maneira correta. (Angelidaki *et. al*, 2009, Hobbs *et al.*, 2018)

Também é possível identificar o desempenho da digestão anaeróbia analisando a produção de biogás relacionada a remoção de SV no reator. (Maragkakia *et al.*, 2018; Zahana *et al.* 2018)

As necessidades nutricionais das populações microbianas envolvidas nos processos biológicos de tratamento são usualmente estabelecidas pela composição química das células microbianas, como a composição exata é raramente conhecida os requisitos são determinados com base na composição. (Puyuelo *et. al*, 2011)

Para que o processo seja operado com sucesso os nutrientes inorgânicos necessários ao crescimento de microrganismos devem atender as quantidades suficientes de nitrogênio e fósforo, desta forma se necessário, é possível ajustar a quantidade da carga no sistema a fim de compensar alguma falta existente, desta

forma se permite fazer o tratamento combinado de resíduos. (McCarty, 1964; Vlasova *et. al*, 2018)

Visando suprir as necessidades das bactérias, mas não impedindo que ocorra a digestão anaeróbia os resíduos devem conter concentrações de carbono e nitrogênio, sendo indicado valores próximos entre 20 e 30 C/N, disponíveis para as bactérias. (Souza, 1984; Puyuelo *et. al*, 2011; Parra-orobioa *et al.* 2018)

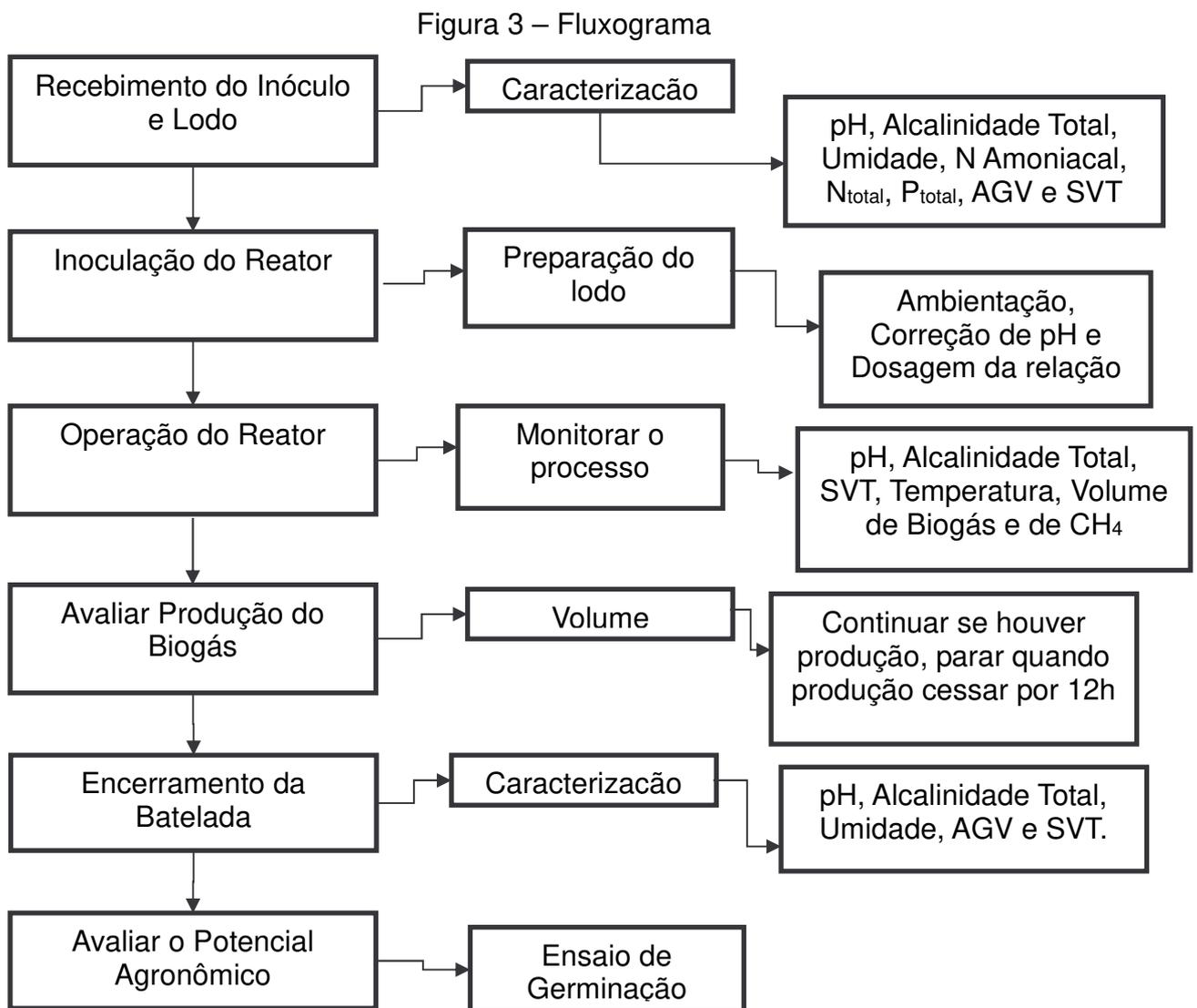
Zahana et al. (2018) concluiu em seu estudo que devem ser utilizadas relações de C/N maiores que 20 para melhor produção de biogás, porém quando ela ultrapassa a relação com 29 seu desempenho decai.

Segundo Parra-orobioa *et al.* (2018), teoricamente os lodos provenientes de uma ETE além de ser compatíveis (anaeróbios e aeróbios) e costumam possuir quantidade suficiente de nutrientes para fornecer o crescimento bacteriano. (Parkin e Owen, 1986)

O nitrogênio é o nutriente de maior consumo no crescimento dos microrganismos desta forma, a amônia e a porção de nitrogênio orgânico liberados durante a degradação são as maiores fontes de nitrogênio utilizada por eles, entretanto também devem ser atendidos as concentrações entre fósforo e enxofre no sistema, pois constituem macromoléculas de células microbianas, sendo indicado a porção de 1/5 da estabelecida para o C/N. (Souza, 1984; Parkin e Owen, 1986; Parra-orobioa *et al.* 2018)

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as etapas que foram a serem seguidas para o desenvolvimento da pesquisa. O experimento foi realizado no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade do Vale do Rio dos Sinos em São Leopoldo/RS. O fluxograma apresentado na figura 3, demonstra as etapas do trabalho.



O lodo utilizado como inóculo foi obtido do reator UASB da estação de tratamento de esgoto sanitário da Unisinos. Já o resíduo de lodo ativado foi obtido do sistema de tratamento por “Lodos Ativados” de aeração prolongada da ETE São João Navegantes em Porto Alegre/RS, a qual trata o esgoto sanitário de uma população equivalente a 300.000 pessoas.

Em todas as bateladas antes de iniciar os testes, ambos os resíduos foram caracterizados com relação ao pH, Alcalinidade, Umidade, Sólidos Voláteis Totais (SVT), Nitrogênio total (Nt) e amoniacal (NA), Fósforo total (Pt) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV).

Os lodos foram coletados antes dos testes e armazenados em recipiente apropriado, sendo acondicionados em temperatura entre 0 a 5°C

Buscando verificar o potencial metanogênico do inóculo, foi adotado um simples teste, esta análise utilizou como base 3g de acetato de sódio $C_2H_3NaO_2$, resultando na produção de 90 ± 20 ml em aproximadamente 12H.

3.2 Sistema experimental

O experimento utilizou três reatores anaeróbios operados simultaneamente. Os reatores são compostos por garrafas de vidro de borossilicato, com volume total de 2 L, conforme figura 4.

Figura 4 – Reatores de bancada utilizados no estudo



Os reatores foram inoculados com o lodo anaeróbio do reator UASB da ETE Unisinos. A relação de Inóculo/Substrato foi definida com base na massa de sólidos

voláteis totais presentes no inóculo e no substrato (resíduo de lodo ativado). Foram avaliadas as relações inóculo/substrato para Reator 1 (I/S: 1:1), Reator 2 (I/S: 2:1), e Reator 3 (I/S: 3:1), estes valores foram escolhidos ao acaso, partindo da relação 1:1 e reduzindo a proporção de substrato da mistura.

Cada reator anaeróbio foi operado com o inóculo e o lodo nas relações estabelecidas. Para a medição diária do volume de biogás foi realizada utilizando o método de deslocamento de coluna de água, normalizado em função da pressão e temperatura.

Os reatores, conforme figura 5, foram mantidos em temperatura mesofílica ($35^{\circ}\text{C} \pm 1$) mantida através de um banho termostático.

Figura 5 – Sistema experimental constituído de banho termostático com controle eletrônico de temperatura e reatores anaeróbios



3.3 Monitoramento do sistema

Os parâmetros monitorados são apresentados no quadro 3, e foram analisados de acordo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA,2012).

Os procedimentos foram realizados em duplicata imediatamente após a coleta das amostras.

Para a realização do ensaio de verificação da qualidade do biogás foi feito a retirada de aproximadamente 50mL do biogás. A análise utilizou o kit portátil para análise de biogás da Alfakit conforme a figura 6.

Figura 6 – Kit para análise do biogás



Fonte: Site Alfakit (2018)

Quadro 4 – Parâmetros físico-químicos analisados na digestão anaeróbia do resíduo de lodo ativado

Parâmetros	Método	Frequência			Referência
		Inóculo	Reator	Digestato	
ST	Gravimétrico	Antes de iniciar o ensaio	Semanal	Final de cada ensaio	APHA 2012
STV					
pH	Potenciométrico		Diário		
Alcalinidade total	Titulométrico		Semanal		
Alcalinidade parcial					
AGV					
Nt					
NH ₄					
Pt	Colorimétrico		Início da digestão		
Volume biogás	Deslocamento coluna d'água	Diário			
% CH ₄	Volumétrico			EMBRAPA	

3.4 Potencial agrônômico – Índice de germinação

Após ocorrido o ensaio nos reatores, foi realizada uma avaliação do digestato quanto ao índice de germinação, conforme o Manual para Análise de Sementes, elaborado pelo MAPA.

As sementes de alface (*Lactuca Sativa*) foram tiradas da dormência colocando-as em pré-esfriamento a 10°C por três dias, após deixadas a luz natural por 30 minutos.

Foi realizado o ensaio utilizando 25 unidades de sementes, selecionadas ao acaso, colocadas em placa de Petri sobre papel filtro.

O digestato foi filtrado e irrigado sobre as sementes na proporção de 3x a massa do substrato (papel filtro). Para manter a humidade as placas foram tampadas.

As placas foram acondicionadas em câmara com 8 horas de luz por ciclo de 24 horas, durante sete dias. As características do teste podem ser vistas na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Teste de germinação de alface

Espécie botânica	Substrato	Temperatura (°C)	Contagens (dias)	
			Inicial	Final
<i>Lactuca sativa</i>	SP	20	4	7

Para interpretação dos parâmetros foi seguido o método proposto pelo MAPA (2009), (equação 5).

$$PG = (NG \times 100) / NT$$

Equação 5

Onde:

PG: porcentagem de germinação (%),

NG: número de sementes germinadas,

NT: número total de sementes no teste.

4 RESULTADOS

Conforme as análises feitas no laboratório, os materiais foram ensaiados logo que retirados da respectiva ETE, desta forma foi possível caracterizar substrato e inóculo, conhecendo os parâmetros destes materiais que foram objetos da pesquisa, a tabela 6 apresenta os resultados do primeiro ensaio.

Tabela 6 – Características do inóculo e substrato

Parâmetro	Inóculo	Substrato
ST (mg/g)	60,53	220,65
STF (mg/g)	29,65	113,37
STV (mg/g)	30,88	107,29
STV (%)	51,02	48,64
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	658,70	90,20
AGV (mg CH ₃ COOH/L)	489,60	571,20
pH	7,14	5,22
N amoniacal (mg/L)	-	619,92
NT (mg/L)	-	7700,22
P _T (mg/L)	-	17,86

Avaliando os dados obtidos observou que o inóculo havia menor teor de sólidos voláteis, fazendo pensar sobre a possibilidade da transformação de toda esta matéria orgânica por via anaeróbia.

Para iniciar os ensaios foram consideradas condições que favorecessem a biodigestão, para isso optou-se em equalizar as concentrações de matéria orgânica com base na massa de sólidos voláteis. Os volumes introduzidos em cada reator foram dimensionados após a realização da conversão da massa de sólidos voláteis com a massa de lodo úmida, levando em consideração o volume total utilizado no reator de 1,0L.

Os resultados apresentados a seguir são provenientes do ensaio em triplicata, para efeito de análise comparativa foi desconsiderado o resultado com maior diferença, ou que seja, destoou numericamente dos outros dois resultados.

As relações Inóculo/Substrato foram organizadas em capítulos independentes denominados Reator 1 (I/S: 1:1), Reator 2 (I/S: 2:1) e Reator 3 (I/S 3:1).

4.1 Reator 1

A variação da massa de sólidos voláteis em relação a amostra variou em todos os ensaios, sendo encontrados os valores entre 1,93 e 3,97%, estas concentrações do substrato e inóculo no primeiro ensaio podem ser verificadas na tabela 7.

Tabela 7 – Concentrações de substrato e inóculo do reator 1 (I/S 1:1)

Ensaio	Lodo	ST (%)	SV (%)	Relação (%)	ST (mg/g)	SVT (mg/g)	Relação (m/m)
1	Inóculo	6,05	3,09	0,78	47,09	24,02	1:1
	Substrato	22,07	10,82	0,22	48,99	24,02	
2	Inóculo	3,77	1,93	0,85	31,99	16,40	1:1
	Substrato	22,07	10,82	0,15	33,44	16,40	
3	Inóculo	7,87	3,97	0,73	57,55	29,03	1:1
	Substrato	22,07	10,82	0,27	59,21	29,03	

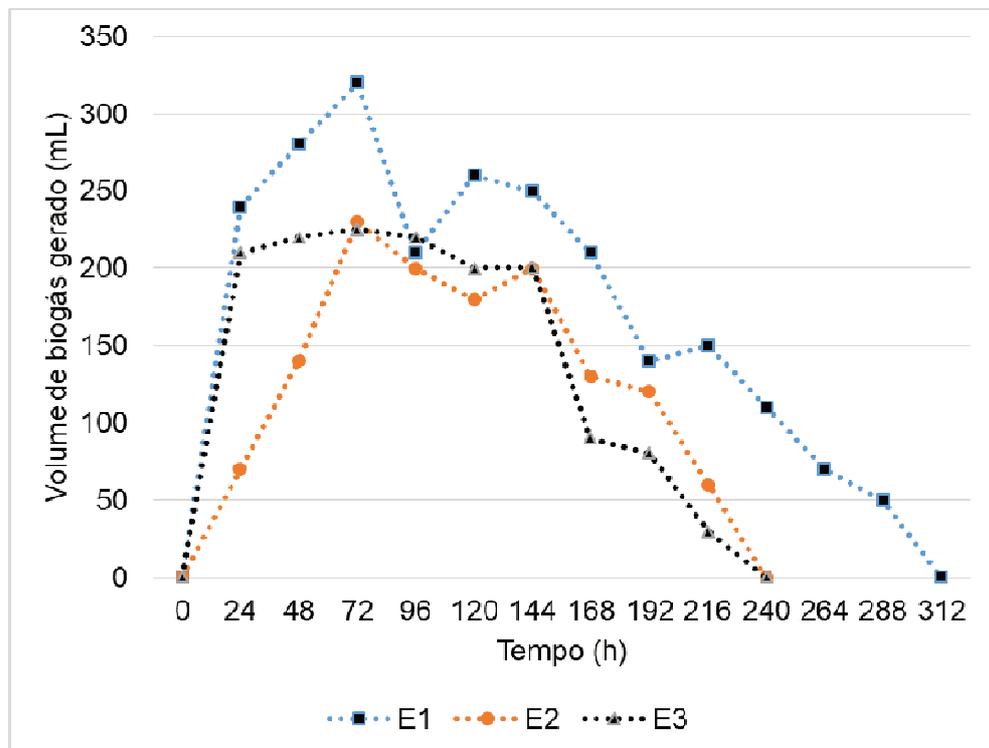
I/S = Inóculo/Substrato

4.1.1 Produção do biogás

O processo de biodigestão apresentou produção de biogás logo nas primeiras horas, tendo produção similar entre os reatores, demonstrando o potencial de oxidação da matéria orgânica, conforme figura 7.

Os reatores apresentaram crescimento na produção diária de biogás até as primeiras 72h (3 dias), quando começaram a reduzir os volumes gerados gradativamente até o final da digestão, os ensaios 2 e 3 tiveram o mesmo tempo de produção finalizando em 240h (10 dias), enquanto o primeiro prolongou-se até 312h (13 dias).

Figura 7 – Produção de biogás para os ensaios 1, 2 e 3 utilizando relação (I/S 1:1)



Observando a produção total de biogás na figura 8, verifica-se similaridade nos volumes produzidos pelos ensaios 2 e 3.

O volume encontrado no ensaio 1 foi de 2290 mL, seguido 1330 mL no 2 e 1475 mL no 3, estes volumes podem indicar uma melhor produção logo no primeiro ensaio, porém a tabela 8 apresenta a produção relacionada a massa de sólidos voláteis ingeridos no reator.

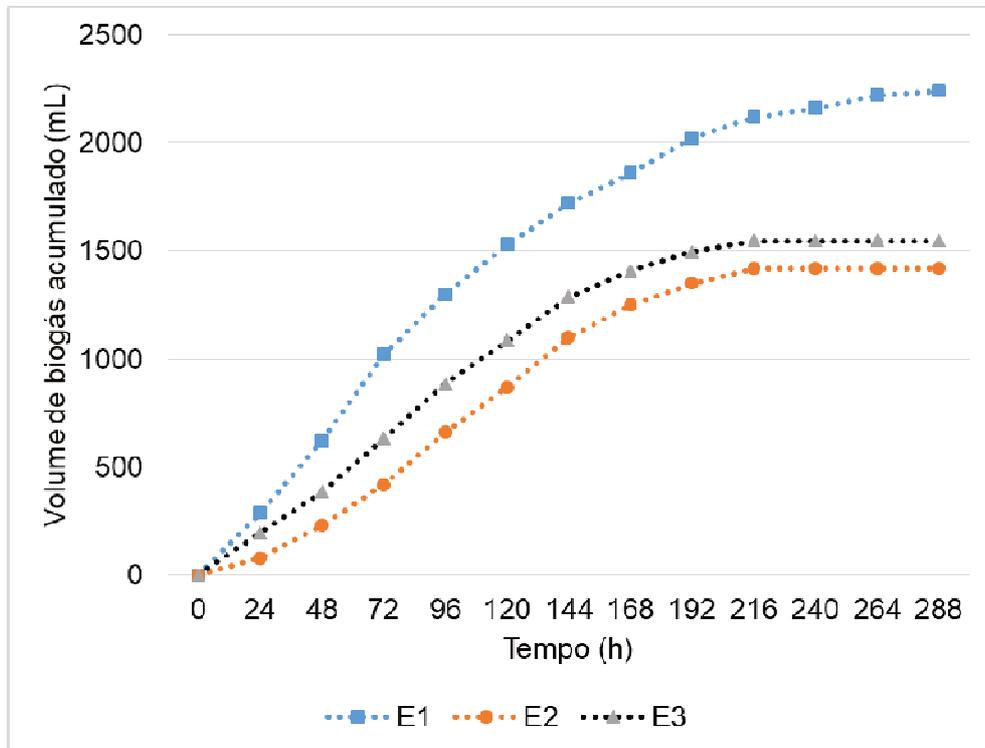
Tabela 8 – Produção de biogás no Reator 1

Reator (1:1)	SVT (mg/g)	Biogás (mL)	Rendimento (mL.Biogás/mg.SVT)
E1	24,02	2290,00	95,34
E2	16,40	1330,00	81,10
E3	29,03	1475,00	50,81

Segundo os dados, o ensaio nº 1 apresentou o melhor aproveitamento na produção volumétrica de biogás, sendo encontrado 95,34 mL.Biogás/mg.SVT, resultando em uma produção média no primeiro reator de 88,22 mL.Biogás/mg.SVT.

Salienta-se que o rendimento de 50,81 mL.Biogás/mg.SVT foi desconsiderado para o cálculo da média.

Figura 8 – Produção total de biogás do reator 1, (I/S 1:1)



4.1.2 Teor de CH₄

A taxa de metano presente no biogás foi monitorada diariamente, sendo possível acompanhar os resultados obtidos na figura 9.

Com base nos resultados apresentados, permitiu-se verificar as médias de produção de metano em cada ensaio, sendo 73% no primeiro, seguido de 82% e 74% no segundo e terceiro.

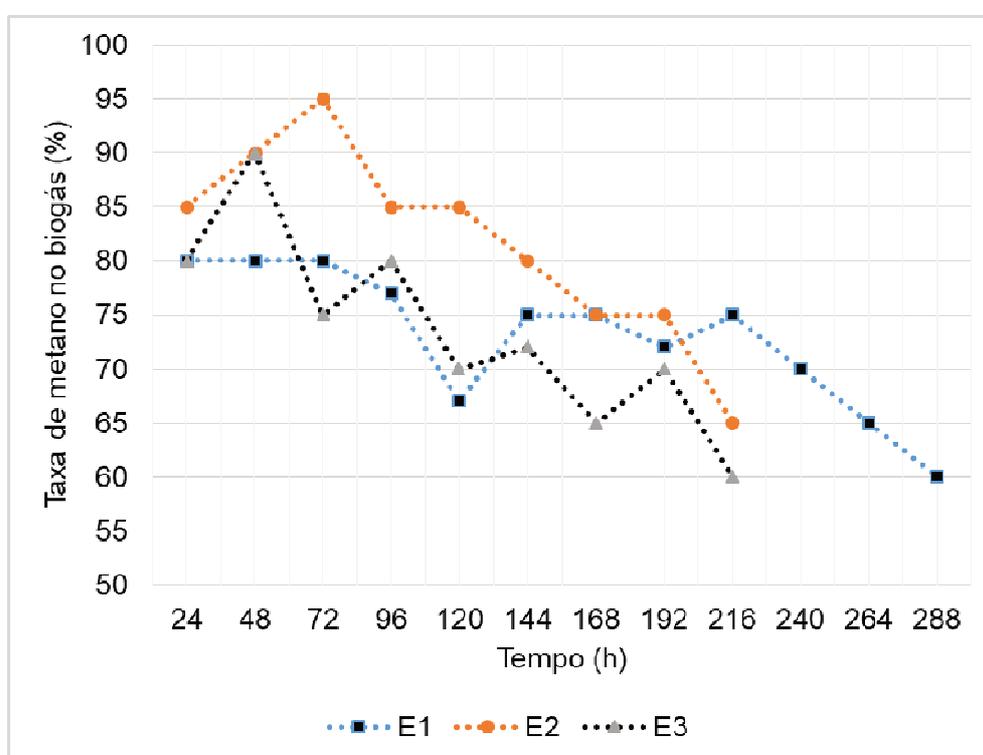
Segundo os valores apresentados na tabela 9, o ensaio 1 obteve a maior produção de CH₄, com volume total de 1718,70mL e 71, mL.CH₄/mg.SVT, sendo considerado o valor médio desta relação 69,72mL/mg.SVT. Enfatiza-se a remoção do rendimento de 38,83 mL.Biogás/mg.SVT para o cálculo da média.

Tabela 9 – Produção de CH₄ no reator 1 (I/S 1:1)

Reator	SVT (mg/g)	Volume de CH ₄ (mL)	Rendimento (mL.CH ₄ /mg.SVT)
E1	24,02	1718,70	71,55
E2	16,40	1113,50	67,90
E3	29,03	1127,25	38,83

Para efeito quantitativo, pode-se converter os resultados para condições usais em m³/t.lodo, nesta situação os valores podem chegar a 69,72m³/t.lodo.

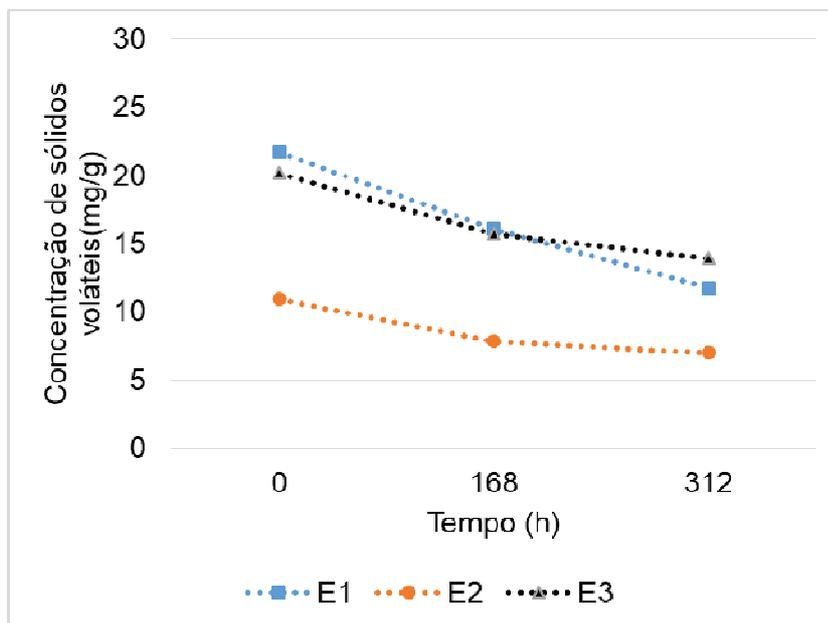
Figura 9 – Taxa de metano no reator 1 (I/S 1:1)



4.1.3 Remoção de SVT

Relacionado diretamente com a produção do biogás, a remoção de sólidos voláteis apresenta a capacidade de digestão do resíduo, a figura 10 exhibe a concentração de SVT no interior do reator.

Figura 10 – Concentração de sólidos no reator 1 (I/S 1:1)



A remoção ocorreu em todos os ensaios, considerando neste reator a redução média de 34%. Ressalta-se a desconsideração do resultado de 46% para o cálculo da média, tabela 10.

Tabela 10 – Remoção de SVT no reator 1 (I/S 1:1)

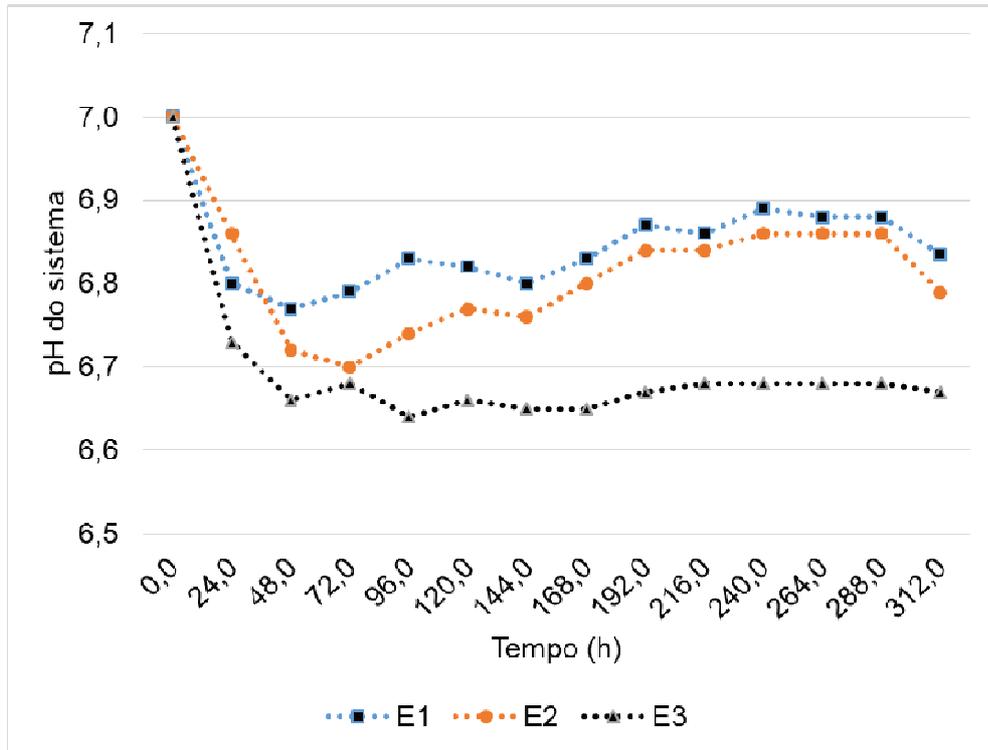
Reator	Concentração de SVT (mg/g)			Remoção (%)
	0h	168h	336h	
E1	21,70	16,05	11,72	46%
E2	10,92	7,83	6,99	36%
E3	20,18	15,73	13,92	31%

4.1.4 pH

A produção de biogás da está relacionada com as condições ambientais do reator, este conjunto de fatores encontrados demonstram que o sistema está trabalhando nos níveis que otimizam sua geração e teor de metano.

Em ambos os ensaios a faixa de do pH ficou nos níveis que favorecem a metanogênese, acima de 6,6. Os valores e comportamento dos ensaios estão na figura 11.

Figura 11 – Comportamento do pH no reator 1 (I/S 1:1)

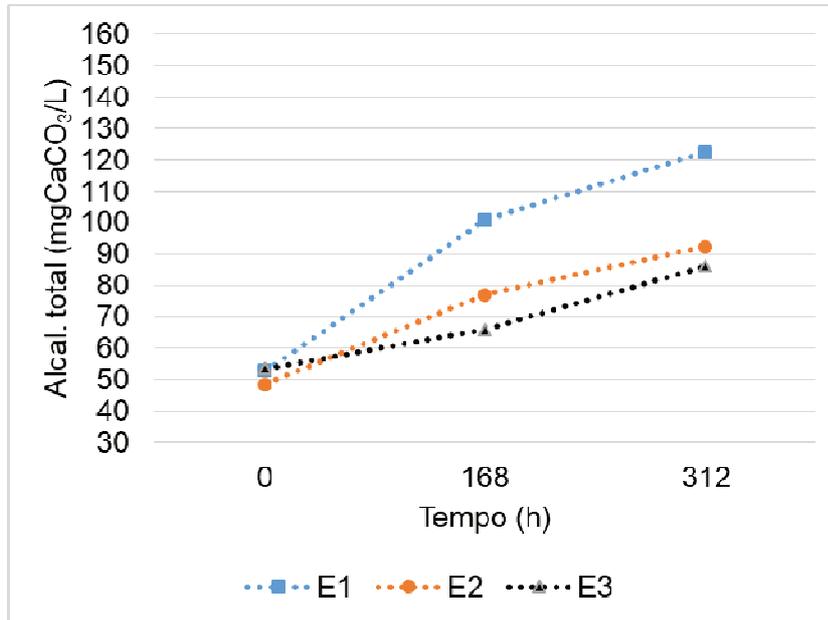


4.1.5 Alcalinidade

Diretamente relacionada a estabilidade do sistema, os níveis de pH, a Alcalinidade e AGV, demonstram o equilíbrio entre as fases da digestão anaeróbia, conforme a figura 13 ocorreu o crescimento da alcalinidade em todos os ensaios.

Considerando as informações apresentadas, pode-se dizer que o balanço entre inóculo e substrato era adequado, pois a alcalinidade não foi consumida pelos AGV's presentes derrubando o pH, e sim estes níveis demonstram que os ácidos foram convertidos pelas bactérias, e por resultado elevaram os valores de pH.

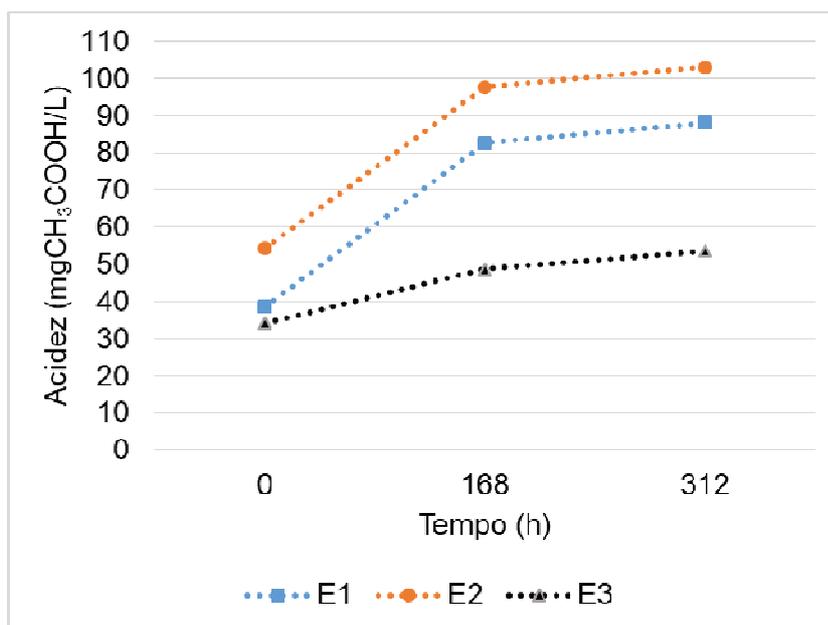
Figura 12 – Comportamento da alcalinidade no reator 1 (I/S 1:1)



4.1.6 AGV

Seguindo o comportamento da alcalinidade, os níveis de ácidos graxos voláteis também cresceram, trazendo valores maiores com o passar das horas, a figura 13 demonstra estes valores.

Figura 13 – Comportamento do AGV no reator 1 (I/S 1:1)



Concluindo este subcapítulo, pode-se verificar no ensaio nº 3 menor eficiência na produção de biogás, resultando em menor concentração de metano, nível de pH, alcalinidade e acidez, entretanto por se tratar de um estudo em triplicata estes resultados serviram para comprovar o desempenho da relação I/S 1:1

4.2 Reator 2

Os resultados dos ensaios de caracterização do reator 2 (I/S 2:1) podem ser verificados na tabela 11.

Tabela 11 – Concentrações de substrato e inóculo em cada reator do ensaio 2

Ensaio	Lodo	ST (%)	SV (%)	Relação (%)	ST (mg/g)	SVT (mg/g)	Relação (m/m)
1	Inóculo	6,05	3,09	0,88	52,97	27,02	2:1
	Substrato	22,07	10,82	0,12	27,56	13,51	
2	Inóculo	3,77	1,93	0,92	34,62	17,74	2:1
	Substrato	22,07	10,82	0,08	18,09	8,87	
3	Inóculo	7,87	3,97	0,85	66,46	33,53	2:1
	Substrato	22,07	10,82	0,15	34,19	16,77	

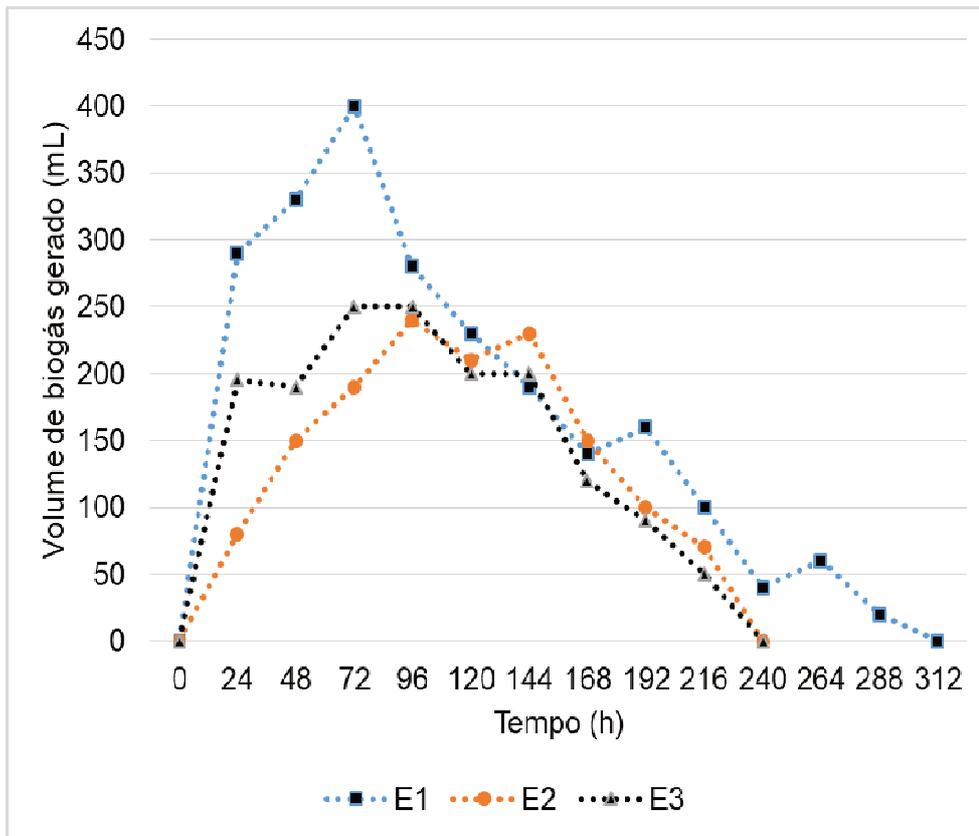
4.2.1 Produção do biogás

Seguindo o desempenho do primeiro reator o processo de biodigestão apresentou produção de biogás nas primeiras horas, tendo produção similar entre os reatores, demonstrando o potencial de oxidação da matéria orgânica, conforme figura 14.

Os ensaios 2 e 3 apresentaram crescimento na produção diária de biogás até as primeiras 96h (4 dias), quando começaram a reduzir os volumes gerados gradativamente até o final da digestão, o ensaio 1 desenvolveu até as 72h (3 dias), para começar a reduzir a produção.

Os ensaios 2 e 3 tiveram o mesmo tempo de produção finalizando em 240h (10 dias), enquanto o primeiro prolongou-se até 312h (13 dias).

Figura 14 – Produção de biogás no reator 2 (I/S 2:1)



Observando a produção total de biogás na figura 15, verifica-se similaridade nos volumes produzidos pelos ensaios 2 e 3

O volume encontrado no ensaio 1 foi de 2240 mL, seguido 1420 mL no 2 e 1545 mL no 3, estes volumes induzem uma melhor produção logo no primeiro ensaio, porém a tabela 12 apresenta a produção relacionada a massa de sólidos voláteis ingeridos no reator.

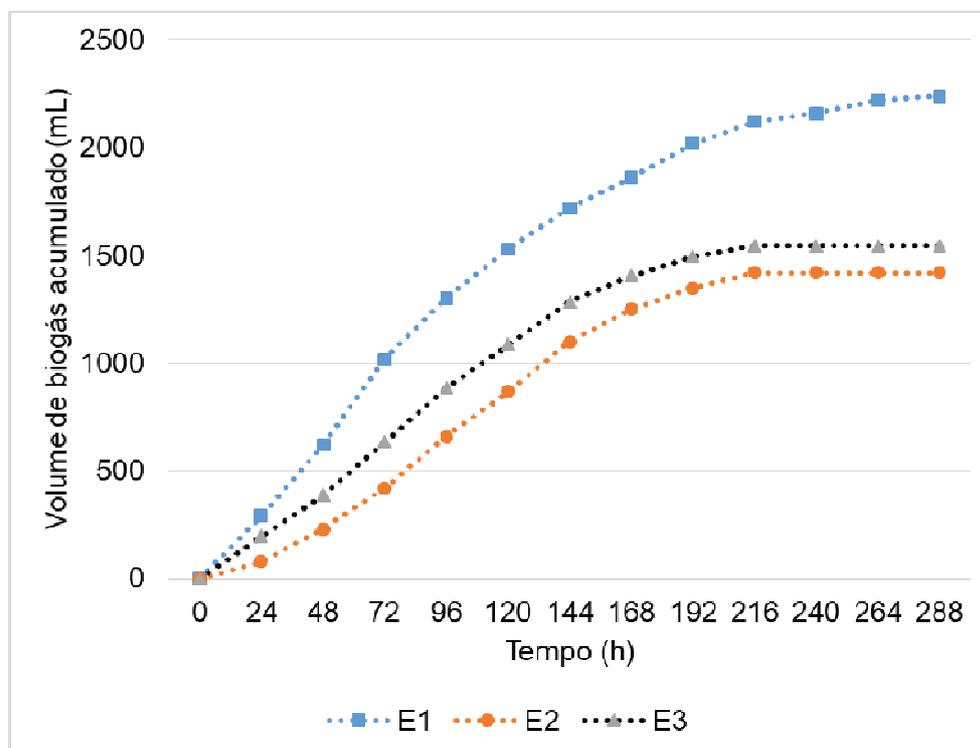
Tabela 12 – Produção de biogás no Reator 2 (I/S 2:1)

Reator (2:1)	SVT (mg/g)	Biogás (mL)	Rendimento (mL.Biogás/mg.SVT)
E1	13,51	2240,00	165,80
E2	8,87	1420,00	160,09
E3	16,77	1545,00	92,13

Conforme os resultados, o ensaio nº 1 apresentou o melhor aproveitamento na produção volumétrica de biogás, sendo encontrado 165,80 mL.Biogás/mg.SVT, resultando em uma produção média no primeiro reator de 162,95

mL.Biogás/mg.SVT. Avisa-se que o rendimento de 92,13 mL.Biogás/mg.SVT foi desconsiderado para o cálculo da média.

Figura 15 – Produção total de biogás do reator 2 (I/S 2:1)



4.2.2 Teor de CH₄

A taxa de metano presente no biogás foi monitorada diariamente, sendo possível acompanhar os resultados obtidos na figura 16.

Com base nos resultados apresentados, permitiu-se verificar as médias de produção de metano em cada ensaio, sendo 76% no primeiro, seguido de 82% e 79% no segundo e terceiro.

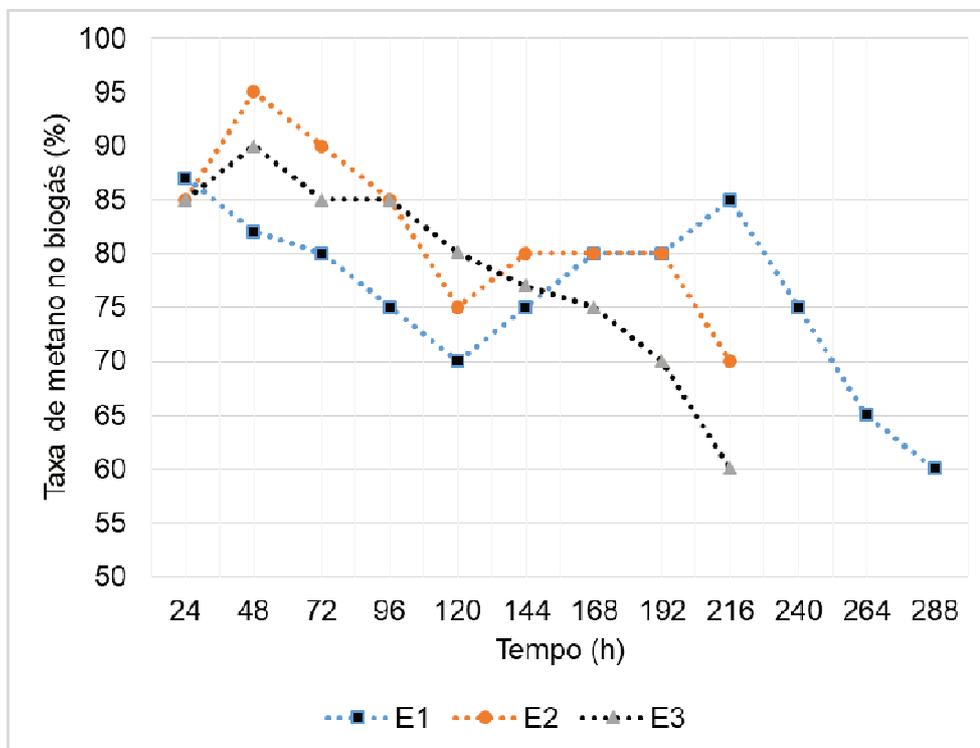
Segundo os valores apresentados na tabela 13, o ensaio 1 obteve a maior produção de CH₄ em volume total 1706,13mL, porém o ensaio 2 teve maior eficiência com 131,63 mL.CH₄/mg.SVT, sendo considerado o valor médio do reator em 128,96 mL/mg.SVT. Enfatizo a remoção do rendimento de 72,37 mL.Biogás/mg.SVT para o cálculo da média.

Tabela 13 – Produção de CH₄ no reator 2 (I/S 2:1)

Reator	SVT (mg/g)	Volume de CH ₄ (mL)	Rendimento (mL.CH ₄ /mg.SVT)
E1	13,51	1706,13	126,29
E2	8,87	1167,56	131,63
E3	16,77	1213,68	72,37

Para efeito quantitativo, pode-se converter os resultados para condições usais em m³/t.lodo, nesta situação os valores podem chegar a 128,96m³/t.lodo.

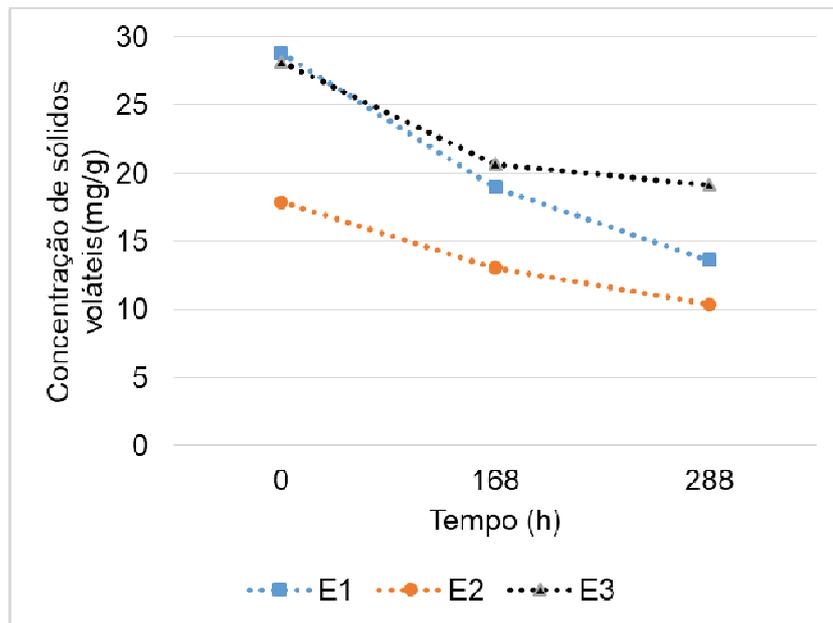
Figura 16 – Taxa de metano no reator 2 (I/S 2:1)



4.2.3 Remoção de SVT

Seguindo as apresentações, a figura 17 remoção de sólidos voláteis exhibe a concentração de SVT no interior do reator 2.

Figura 17 – Concentração de sólidos no reator 2 (I/S 2:1)



A remoção ocorreu em todos os ensaios, considerando neste reator a redução média de 37%. Ressalta-se a desconsideração do resultado de 53% para o cálculo da média, tabela 14.

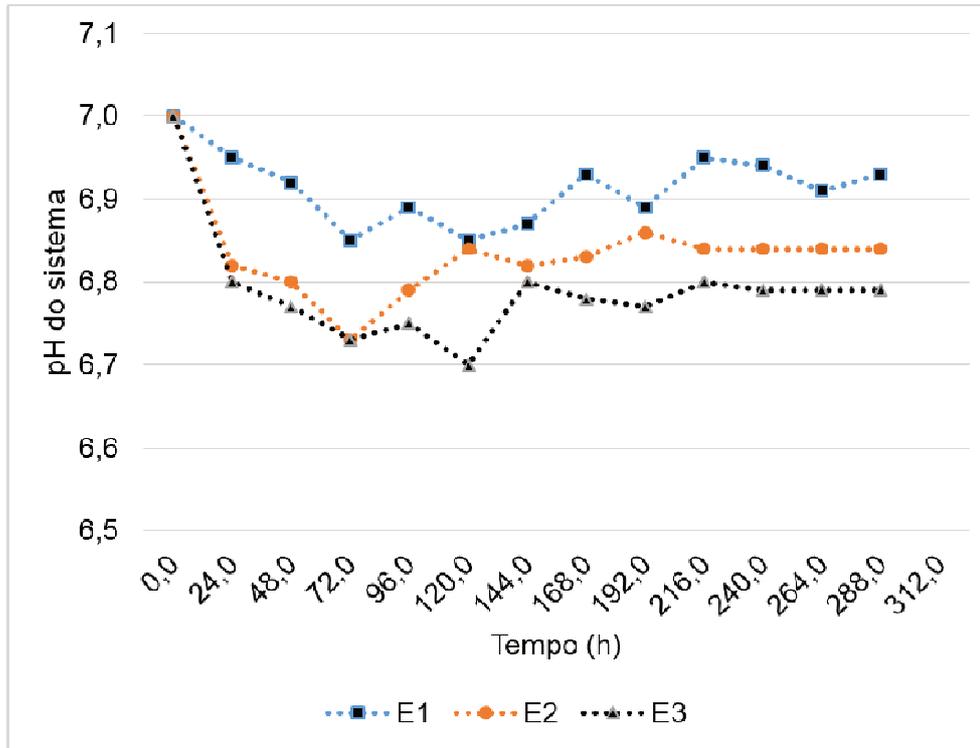
Tabela 14 – Remoção de SVT no reator 2 (I/S 2:1)

Reator	Concentração de SVT (mg/g)			Remoção (%)
	0h	168h	288h	
E1	28,85	18,99	13,56	53%
E2	17,89	13,07	10,38	42%
E3	28,16	20,68	19,15	32%

4.2.4 pH

Em ambos os ensaios a faixa de pH ficou acima de 6,7, o comportamento do segundo reator pode ser observado na figura 18.

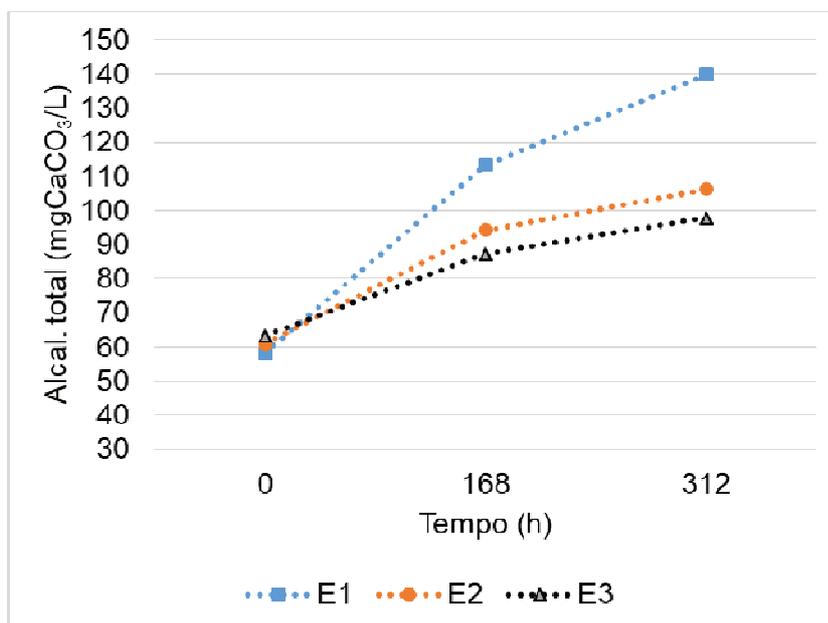
Figura 18 – Comportamento do pH no reator 2 (I/S 2:1)



4.2.5 Alcalinidade

O AGV demonstrou novamente o equilíbrio entre as fases da digestão anaeróbia, conforme a figura 19 ocorreu o crescimento da alcalinidade em todos os ensaios.

Figura 19 – Comportamento da alcalinidade no reator 2 (I/S 2:1)

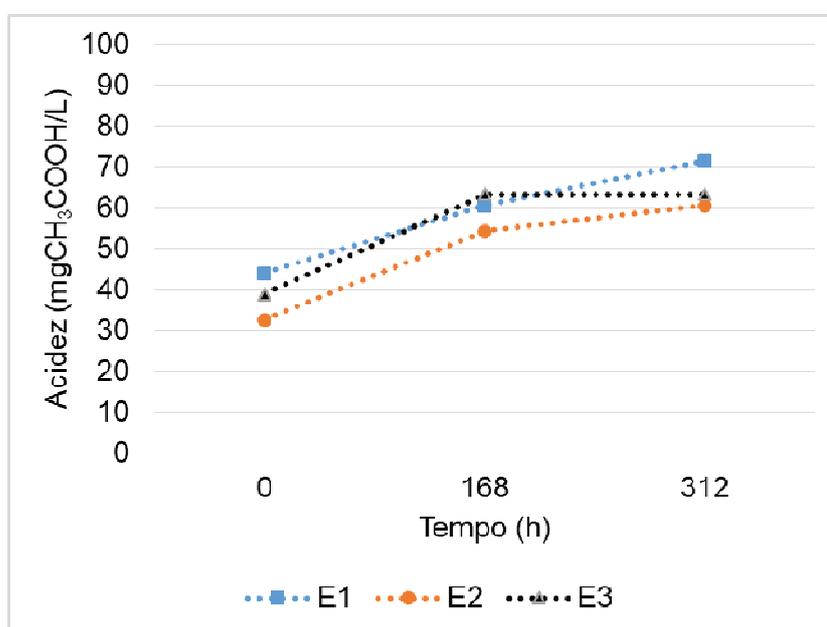


O balanço entre a biomassa e o substrato estava adequado outra vez, apresentando aumento da alcalinidade e do pH.

4.2.6 AGV

Seguindo o comportamento da alcalinidade, os níveis de ácidos graxos voláteis também cresceram, trazendo valores maiores com o passar das horas, a figura 20 demonstra estes valores.

Figura 20 – Comportamento do AGV no reator 2 (I/S 2:1)



Concluindo este subcapítulo, pode-se verificar no ensaio nº 3 menor eficiência na produção de biogás, nível de pH, alcalinidade e acidez, porém teve 79% de metano nos gases gerados pela biodigestão, novamente por se tratar de um estudo em triplicata estes resultados serviram para comprovar o desempenho da relação I/S 2:1

4.3 Reator 3

Os resultados dos ensaios de caracterização do reator 3 (I/S 3:1) podem ser verificados na tabela 15.

Tabela 15 – Concentrações de substrato e inóculo em cada reator do ensaio 3

Ensaio	Lodo	ST (%)	SV (%)	Relação (%)	ST (mg/g)	SVT (mg/g)	Relação (m/m)
1	Inóculo	6,05	3,09	0,25	55,27	28,20	3:1
	Substrato	22,07	10,82	0,75	19,17	9,40	
2	Inóculo	3,77	1,93	0,94	35,59	18,24	3:1
	Substrato	22,07	10,82	0,06	12,40	6,08	
3	Inóculo	7,87	3,97	0,25	70,08	35,36	3:1
	Substrato	22,07	10,82	0,75	24,04	11,79	

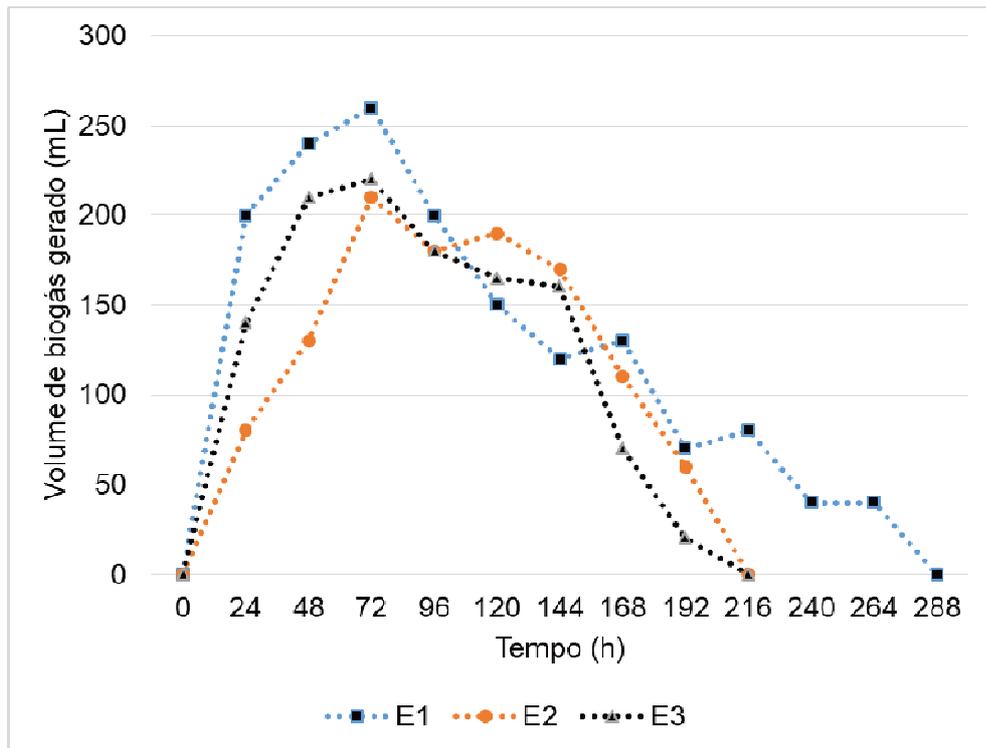
4.3.1 Produção do biogás

Seguindo o desempenho dos demais reatores o processo de biodigestão apresentou produção de biogás nas primeiras horas, comprovando a capacidade de conversão da matéria orgânica em todos os ensaios, estes valores foram similares entre os reatores, conforme figura 21.

Todos os ensaios apresentaram crescimento na produção diária de biogás até as primeiras 72h (3 dias), quando começaram a reduzir os volumes gerados gradativamente até o final da digestão,

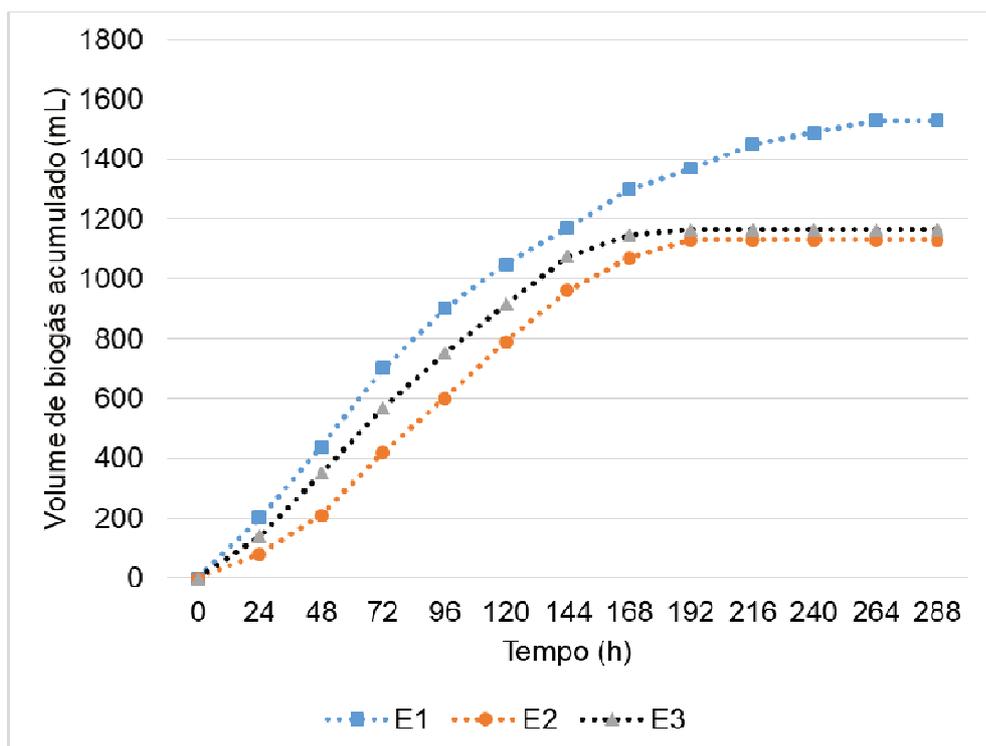
Os ensaios 2 e 3 tiveram o mesmo tempo de produção finalizando em 216h (9 dias), enquanto o primeiro prolongou-se até 288h (12 dias).

Figura 21 – Produção de biogás no reator 3 (I/S 3:1)



Observando a produção total de biogás na figura 22, verifica-se similaridade nos volumes produzidos pelos ensaios 2 e 3

Figura 22 – Produção total de biogás do reator 3 (I/S 3:1)



O volume encontrado no ensaio 1 foi de 1530 mL, seguido 1130 mL no 2 e 1165 mL no 3, estes valores indicam a melhor produção logo no primeiro ensaio, porém a tabela 16 apresenta a produção relacionada a massa de sólidos voláteis ingeridos no reator.

Tabela 16 – Produção de biogás no Reator 3 (I/S 3:1)

Reator (3:1)	SVT (mg/g)	Biogás (mL)	Rendimento (mL.Biogás/mg.SVT)
E1	9,40	1530,00	162,77
E2	6,08	1130,00	185,86
E3	11,79	1165,00	98,81

Conforme os resultados, o ensaio nº 2 apresentou o melhor aproveitamento na produção volumétrica de biogás, sendo encontrado 185,86 mL.Biogás/mg.SVT, resultando em uma produção média no primeiro reator de 174,31 mL.Biogás/mg.SVT. Informo que o rendimento de 98,81 mL.Biogás/mg.SVT foi desconsiderado para o cálculo da média.

4.2.2 Teor de CH₄

A taxa de metano presente no biogás foi monitorada diariamente, sendo possível acompanhar os resultados obtidos na figura 23.

Avaliando os valores resultantes da digestão, foi possível traçar as médias de produção de metano em cada ensaio, o primeiro atingiu 78%, seguido de 73% e 78% no segundo e terceiro.

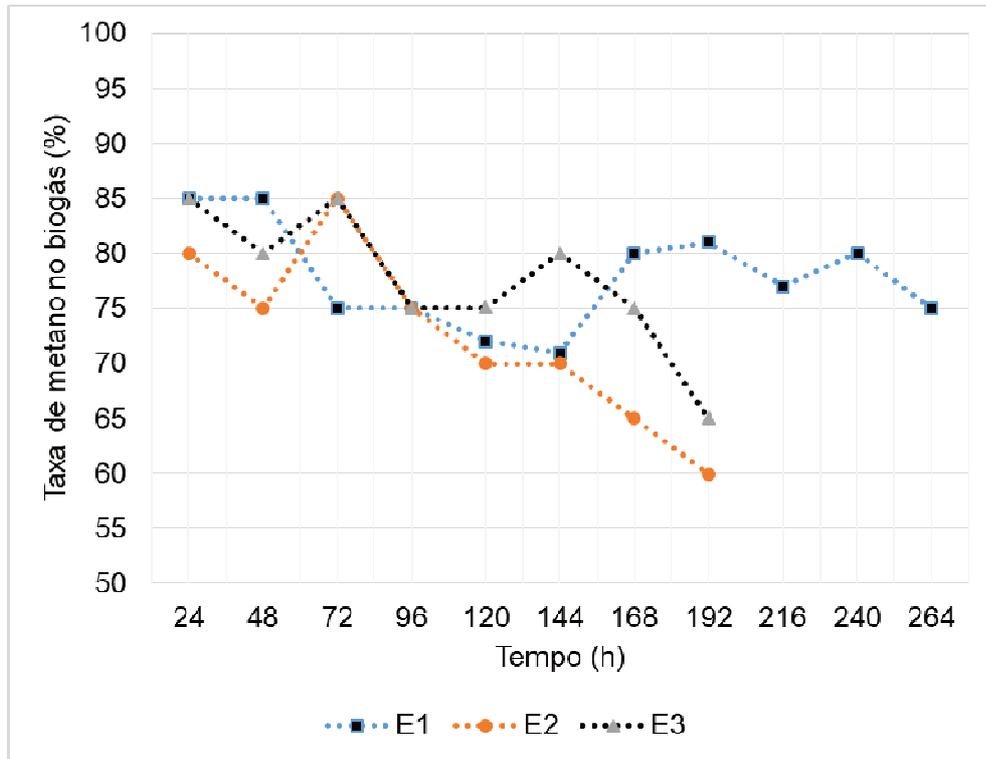
Segundo os valores apresentados na tabela 17, o ensaio 1 obteve a maior produção de CH₄ em volume total 1706,13mL, porém o ensaio 2 teve maior eficiência com 131,63 mL.CH₄/mg.SVT, sendo considerado o valor médio do reator em 130,52 mL/mg.SVT. Enfatiza-se a remoção do rendimento de 76,58 mL.Biogás/mg.SVT para o cálculo da média.

Tabela 17 – Produção de CH₄ no reator 3 (I/S 3:1)

Reator	SVT (mg/g)	Volume de CH ₄ (mL)	Rendimento (mL.CH ₄ /mg.SVT)
E1	9,40	1190,62	126,29
E2	6,08	819,25	134,75
E3	11,79	902,88	76,58

Para efeito quantitativo, pode-se converter os resultados para condições usais em $\text{m}^3/\text{t.lodo}$, nesta situação os valores podem chegar a $130,52\text{m}^3/\text{t.lodo}$.

Figura 23 – Taxa de metano no reator 3 (I/S 3:1)



4.2.3 Remoção de SVT

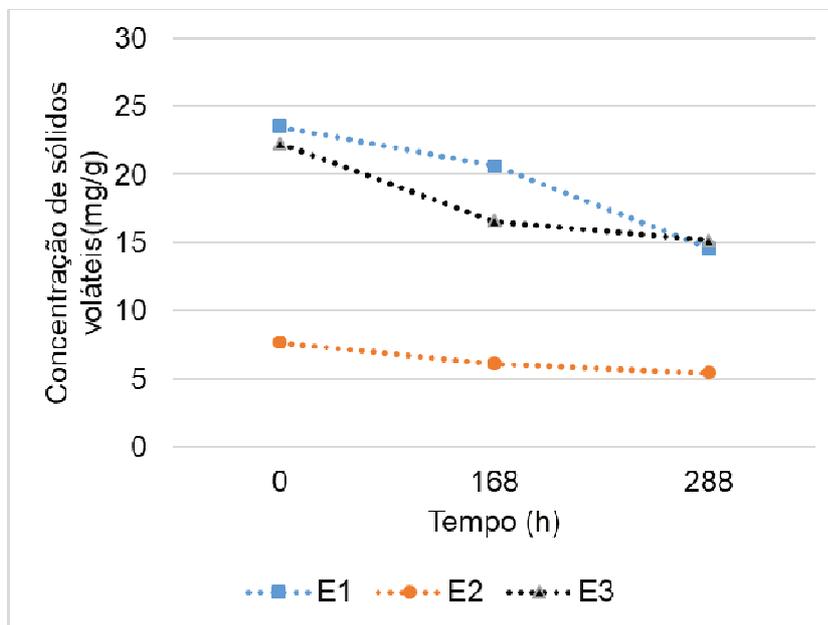
Seguindo as apresentações, a remoção de sólidos voláteis exhibe a concentração de SVT no interior do reator 3, figura 24.

A remoção ocorreu em todos os ensaios, considerando neste reator a redução média de 31%. Ressalta-se a desconsideração do resultado de 38% para o cálculo da média, tabela 18.

Tabela 18 – Remoção de SVT no reator 3 (I/S 3:1)

Reator	Concentração de SVT (mg/g)			Remoção (%)
	0h	168h	288h	
E1	23,51	20,67	14,58	38%
E2	7,70	6,12	5,47	29%
E3	22,28	16,59	15,15	32%

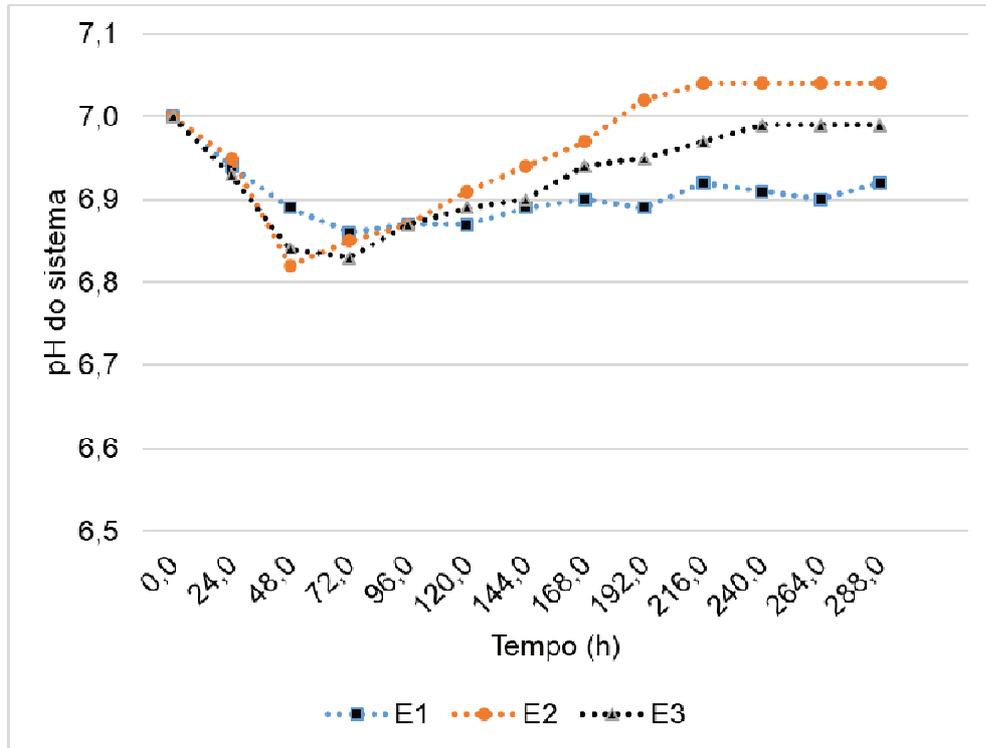
Figura 24 – Concentração de sólidos no reator 3 (I/S 3:1)



4.2.4 pH

Em ambos os ensaios a faixa de pH ficou acima de 6,8 o comportamento do segundo reator pode ser observado na figura 25.

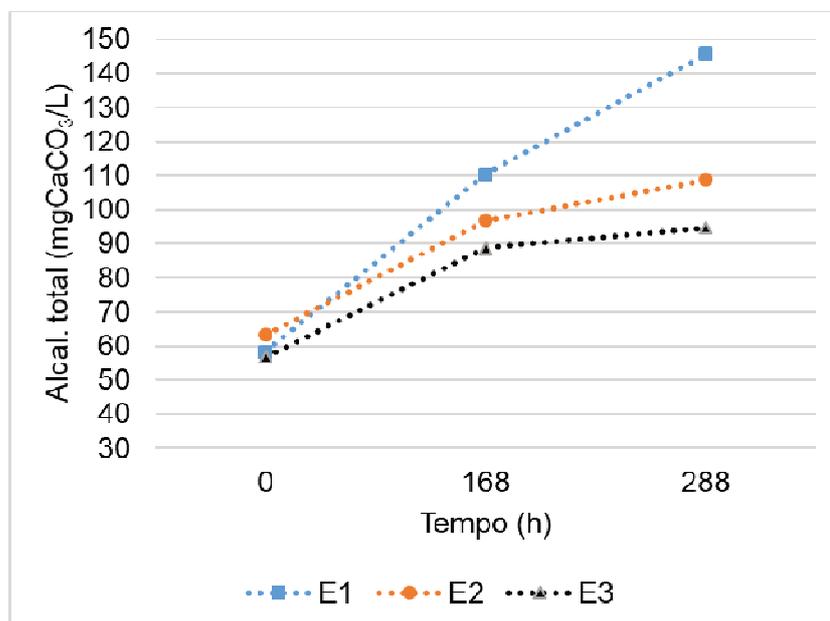
Figura 25 – Comportamento do pH no reator 3 (I/S 3:1)



4.2.5 Alcalinidade

O AGV demonstrou novamente o equilíbrio entre as fases da digestão anaeróbia, conforme a figura 26 ocorreu o crescimento da alcalinidade em todos os ensaios.

Figura 26 – Comportamento da alcalinidade no reator 3 (I/S 3:1)

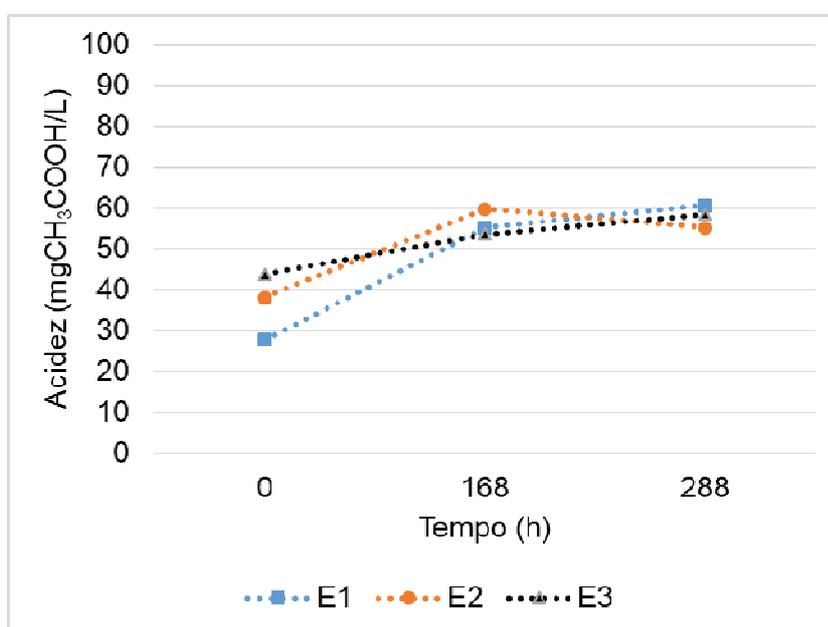


O balanço entre a biomassa e o substrato estava adequado outra vez, apresentando aumento da alcalinidade e do pH.

4.2.6 AGV

Continuando o comportamento da alcalinidade, o AGV novamente aumentou, trazendo valores maiores com o passar das horas, a figura 27 demonstra estes valores.

Figura 27 – Comportamento do AGV no reator 3 (I/S 3:1)



4.4 Considerações

Após apresentados os resultados referentes as relações I/S: 1:1, 2:1, 3:1 coube uma discussão sobre o desempenho comparado entre os ensaios, tabela 19.

Tabela 19 – Produção de biogás nos reatores

Reator	SVT (mg/g)	Biogás (mL)	Rendimento (mL.Biogás/mg.SVT)
1 (1:1)	20,21	1416,10	69,72
2 (2:1)	11,19	1436,85	128,96
3 (3:1)	7,74	1004,94	130,52

Entre as relações utilizadas pode-se salientar a adaptação superior nas relações dos reatores 2 e 3, estes tiveram produção de biogás similar enquanto o reator 1 produziu aproximadamente 46% menos.

A quantidade reduzida de matéria orgânica introduzida nos biodigestores foi capaz de gerar o maior volume de metano, este fato pode estar relacionado as condições de biodegradação de resíduo de lodo ativado, que por maior oferta que tenha não representará em melhor produção.

O reator 3 tinha a menor quantidade de sólidos na relação, porém foi quem melhor desempenhou em relação ao volume de metano por mg.SVT ingerido, atingindo o valor estimado em escala real de 130.52m³/t.lodo.

A redução na produção durante o decorrer do trabalho é característica da digestão anaeróbia, pois logo na partida do sistema a matéria orgânica menos complexa é consumida rapidamente, gerando o pico na produção, após este período alguns substratos necessitam de um período maior para a conversão da matéria em biogás, enquanto outros não serão consumidas de maneira anaeróbia, ocasionando a redução até chegar ao fim.

Os gráficos dos reatores (figuras 9 e 17), apresentam picos na produção de metano, chegando a 95%, este fato pode ser considerado como um provável erro na leitura, devido as limitações do equipamento utilizado.

Analisando os teores médios de 76% no primeiro reator, 79% no segundo e 76% no terceiro, considera-se a concentração similar a encontrada no trabalho de Lin *et al.* (1997), que também avaliou a digestão anaeróbia de excesso de lodo ativado, ultrapassando os resultados presente em literaturas que apontam entre 50 a 70%. (Campos, 1999; Chernicharo, 2007)

A produção de biogás e a concentração de metano são influenciadas pelos níveis de pH, conforme diversos trabalhos, tais como de Latif *et al.* (2017); Parkin e Owen (1986); Parra-orobioa *et al.*(2018). Nestes ensaios todos os reatores apresentaram pH dentro da faixa metanogênica, entre 6,6 a 7,6.

4.5 Potencial agrônômico

Solos agrícolas podem sofrer com a falta de nutrientes, neste caso é conhecida a suplementação com materiais ricos em nitrogênio, fósforo, cálcio,

enxofre, magnésio e potássio. Desta forma pode-se avaliar a utilização do lodo presente nos reatores devido ao nitrogênio e fósforo presente.

Segundo Nunes (2016), o nitrogênio serve como macronutriente primário, sendo o mais utilizado pelos vegetais após carbono, oxigênio e hidrogênio, este material está presente no solo, porém em alguns casos pode ocorrer a necessidade de suplementação nitrogenada, este elemento se faz necessário ao crescimento da planta, podendo ocorrer paralisações em sua falta.

Absorvido pelas plantas e com importante papel no processo vital das plantas (respiração, fotossíntese) o fósforo é responsável também pelo crescimento de raízes e folhas, mesmo sendo absorvido em menores quantidades que os demais nutrientes, C, N, H e O.

Estes lodos utilizados como inóculo e substrato são provenientes de estações de tratamento de esgotos domésticos, e conforme a literatura apresentaram compatibilidade, este fato foi comprovado pela produção de biogás, teor de metano e remoção dos sólidos voláteis, contudo na tabela 21 foi possível verificar os resultados dos ensaios realizados para verificar os nutrientes (nitrogênio e fósforo).

Tabela 20 – Resultados de nitrogênio e fósforo nos reatores no tempo final

Parâmetro	Reator nº 1			Reator nº 2			Reator nº 3		
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Nitrogênio Total (kjeldahl) (mg/L)	3074,82	3229,84	3152,33	2919,80	3023,14	2971,47	2609,71	2790,56	2687,22
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	490,77	542,43	516,60	439,11	490,77	464,94	439,11	516,60	464,94
Fósforo Total (mg/L)	15,73	16,16	15,59	14,99	15,06	15,33	11,80	12,60	12,13

Ambos os nutrientes são importantes ao funcionamento da digestão anaeróbia, servindo como combustíveis para o crescimento da biomassa, os valores encontrados no Fósforo total estão em consonância ao presente em um efluente doméstico, seguindo a faixa entre 10 a 20mg/l. (Jordão e Pessôa, 2005)

O nitrogênio amoniacal influencia diretamente na atividade metanogênicas, neste trabalho foram encontrados valores entre 490 e 542mg/L comprovando o desempenho na produção de metano, segundo Alvarez; Macé; Llabrés, (2000)

teores à cima de 1600mg/L atuam como redutores do fenômeno, e valores além de 5880ml/L inibidores da reação.

Dando seguimento ao processo de análise dos substratos, o digestato foi avaliado com seu potencial de germinação.

Com o intuito de capturar o líquido presente no lodo, foi disposto o material da digestão em um funil com filtro de papel e alocado em um Becker, este fluido após ser mensurado serviu para irrigar as sementes que estavam dispostas sob o filtro na placa de Petri.

A figura 28 apresenta o resultado obtido na placa “B” do reator 3 no segundo ensaio, esta apresentou 92% de percentual de germinação.

É possível visualizar na figura 29 as placas prontas para o ensaio, munidas das sementes e devidamente irrigadas, nesta etapa o processo foi ajustado a fim de simular uma situação real, alocando as peças em ciclo de sol diário.

Figura 28 – Ensaio de germinação concluído.



Figura 29 – Sementes sendo expostas a luz durante ensaio de germinação



Após finalizado os ensaios foi possível observar na tabela 21, os valores obtidos, todos estes reatores apresentaram eficiência maior de 72%, podendo ressaltar o nº 3 que deteve média de 85%, demonstrando que não existe impacto negativo na germinação das sementes quando utilizado o efluente como fonte de nutrientes.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de germinação dos reatores

Biodigestor	E1	E2	E3	Média
Reator 1	80%	76%	78%	78%
Reator 2	72%	72%	76%	73%
Reator 3	84%	84%	88%	85%

Este estudo de germinação foi desenvolvido em função da CONAMA 375/2006, considerar em projetos de reutilização a adoção de lodos provenientes de estação de tratamento de efluentes domésticos, beneficiados posteriormente com a digestão anaeróbia, a temperatura do sistema, tempo de retenção e pH se enquadraram com a norma, assim como a relação de sólidos voláteis totais por

sólidos totais menor que 70%. Este ensaio avaliou possível efeito fitotóxico, porém para a adoção como solução definitiva deve ser considerada a avaliação por outras técnicas além desta.

5 CONCLUSÃO

A escolha por novas ferramentas ou meios de tratamento, devem ser adotadas após estudos variados, com o intuito de ter o maior controle da operação foi adotado o sistema por bancada, este foi muito relevante pois pode-se verificar a produção de biogás a partir dos lodos rejeitados após tratamento do sistema de lodos ativados.

Tendo como diretriz os objetivos desta pesquisa, foi possível concluir sobre o sistema que:

- a) As relações de inóculo/substrato de 3:1, 2:1 e 1:1 possuem potencial de digestão anaeróbia, produzindo biogás e biodegradando sólidos voláteis;
- b) O reator nº3 (I/S 3:1) apresentou melhor eficiência na produção de biogás com 174,31 mL.Biogás/mg.SVT e obteve o maior teor de CH₄ por miligrama de sólidos voláteis removido; gerando 130,52 mL/mg.SVT ou 130,52m³/t.lodo.
- c) A utilização deste inóculo de reator UASB de efluente sanitário doméstico, permitiu a partida do sistema em todas as concentrações, não podendo ser definida a melhor relação para a partida do reator, sabendo que todos produziram biogás logo nas primeiras horas;
- d) Todos os reatores obtiveram média superior a 76% de CH₄ no seu biogás produzido;
- e) O sistema teve comportamento estável durante o período avaliado em todos os ensaios, mantendo o pH dentro da faixa favorável a geração do CH₄;
- f) A qualidade do lodo digerido atingiu o padrão de SVT/ST e pH estipulado na CONAMA 375;
- g) O lodo digerido nos reatores não afetou no potencial de germinação das sementes, atingindo valores superiores a 73%.

Considerando as limitações práticas deste trabalho, pode-se salientar que uma das maiores dificuldades estava relacionada à remoção das amostras de lodo para o monitoramento semanal, pois era necessário abrir a tampa superior do reator permitindo o contato com o ar, mesmo que em curto período.

Como sugestões para trabalhos futuros recomendo:

- a) Avaliar relações de massa de SVT do inóculo/substrato maior do que 1:1;
- b) Buscar utilizar o lodo digerido final como inóculo de outra série de ensaio;
- c) Comparar a produção de biogás e remoção de sólidos com temperatura maior durante os primeiros dias;
- d) Utilizar um sistema que permita a agitação dos reatores;
- e) Verificar a possibilidade de realizar o trabalho com alimentação contínua;
- f) Realizar a utilização de cromatografia gasosa, para entender os gases gerados na biodigestão;
- g) Identificar os AGV's produzidos durante a biodigestão;
- h) Aprofundar o estudo de utilização do lodo digerido no meio agrícola.

REFERÊNCIAS

- ANGELIDAKI, Irini et al. **Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays.** Water science and technology, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.
- APPELS, Lise et al. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge.** Progress in energy and combustion science, v. 34, n. 6, p. 755-781, 2008.
- AQUINO, Sérgio F. de; CHERNICHARO, Carlos AL. **Build up of volatile fatty acids (VFA) in anaerobic reactors under stress conditions: causes and control strategies.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
- BERTOLDI, M. de; VALLINI, G. et; PERA, A. **The biology of composting: a review.** Waste Management & Research, v. 1, n. 2, p. 157-176, 1983.
- BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 7 de novembro de 2006.
- CAMPOS, J. R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anearóbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. **Reatores anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. 380 p. v. 5.
- GE, Huoqing; JENSEN, Paul D.; BATSTONE, Damien J. Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge. water research, v. 45, n. 4, p. 1597-1606, 2011.
- GUAN, Renpeng et al. **Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: A review.** Science of the Total Environment, v. 609, p. 1433-1442, 2017.
- HO, Dang P.; JENSEN, Paul D.; BATSTONE, Damien J. Methanosarcinaceae and acetate oxidising pathways dominate in high-rate thermophilic anaerobic digestion of waste activated sludge. Applied and environmental microbiology, p. AEM. 01730-13, 2013.
- HOBBS, Shakira R. et al. **Enhancing anaerobic digestion of food waste through biochemical methane potential assays at different substrate: inoculum ratios.** Waste management, v. 71, p. 612-617, 2018.
- JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005. 932 p.

LATIF, Muhammad A.; MEHTA, Chirag M.; BATSTONE, Damien J. **Influence of low pH on continuous anaerobic digestion of waste activated sludge.** Water research, v. 113, p. 42-49, 2017.

LIN, Jih-Gaw; CHANG, Cheng-Nan; CHANG, Shou-Chung. **Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization.** Bioresource technology, v. 62, n. 3, p. 85-90, 1997.

LETTINGA, Gatze. **Anaerobic digestion and wastewater treatment systems.** Antonie van leeuwenhoek, v. 67, n. 1, p. 3-28, 1995.

MARAGKAKI, A. E. et al. **Boosting biogas production from sewage sludge by adding small amount of agro-industrial by-products and food waste residues.** Waste Management, v. 71, p. 605-611, 2018.

MCCARTY, PERRY L. **Anaerobic waste treatment fundamentals.** Public works, v. 95, n. 9, 1964

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5. ed. Porto Alegre, 2016. 1980 p.

NUVOLARI, Ariovaldo et al. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565 p.

PARKIN, Gene F.; OWEN, William F. **Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges.** Journal of Environmental Engineering, v. 112, n. 5, p. 867-920, 1986.

PARRA-OROBIO, Brayan Alexis et al. **Effect of inoculum on the anaerobic digestion of food waste accounting for the concentration of trace elements.** Waste Management, v. 71, p. 342-349, 2018.

PUYUELO, Belén et al. **Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions.** Chemosphere, v. 85, n. 4, p. 653-659, 2011.

SANT'ANNA JR, Geraldo Lippel. **Tratamento biológico de efluentes: Fundamentos e aplicações.** 1. ed. Rio de Janeiro, 2010. 418 p.

SOUZA, M. E. DE. **Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.** Revista DAE, v. 44, n. 137, p. 7, 1984.

V. ANDREOLI, Cleverson; SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** 1. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG/SANEPAR, 2007. 484 p. v. 6.

VLASOVA, Marina et al. **Closed cycle of recycling of waste activated sludge.**

Waste Management, v. 71, p. 320-333, 2018.

VON SPERLING, Marcos Von. **Lodos ativados:** Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005. 428 p. v. 4.

VON SPERLING, Marcos Von. **Princípios básicos do tratamento de esgotos:** Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 1. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2009. 211 p. v. 2.

WANG, Ling; AZIZ, Tarek N.; FRANCIS, L. Determining the limits of anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge with grease interceptor waste. Water research, v. 47, n. 11, p. 3835-3844, 2013.

ZAHAN, Zubayeda; OTHMAN, Maazuza Z.; MUSTER, Tim H. **Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation.** Waste Management, v. 71, p. 663-674, 2018.