

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



OLGA ELIZA ROCHA E SILVA

**Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim-
elefante com vinhaça em reator em batelada**

Maceió

2020

OLGA ELIZA ROCHA E SILVA

**Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim-
elefante com vinhaça em reator em batelada**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Coorientador: Dr. Anderson Carlos Marafon

Maceió

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586p Silva, Olga Eliza Rocha e.
Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim elefante com vinhaça em reator em batelada / Olga Eliza Rocha e Silva. – 2020.
87 f. : il. color.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Co-orientador: Anderson Carlos Marafon.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 62-70.

Anexos: f. 71-87.

1. Digestão anaeróbia. 2. Metano. 3. Reatores anaeróbios. I. Título.

CDU: 662.767



Folha de Aprovação

OLGA ELIZA ROCHA E SILVA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA
DE CAPIM-ELEFANTE COM VINHAÇA EM REATOR EM BATELADA

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Recursos
Hídricos e Saneamento, Centro de
Tecnologia da Universidade Federal
de Alagoas, como requisito para
obtenção do título de Mestre em
Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: 20 / 02 / 2020

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim
(Orientador- PPGRHS)

Prof. Dr. Anderson Carlos Marafon
(Coorientador- EMBRAPA)

Banca examinadora:

Prof.ª Dr.ª Daniele Vital Vich
(Examinadora interna – PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof.ª Dr.ª Norma Cândida dos Santos Amorim
(Examinadora externa – IFAL)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me iluminado nessa jornada e permitido trabalhar e conviver com pessoas especiais que me trouxeram muito aprendizado durante o mestrado.

À minha família, especialmente minha mãe, Elisabeth Rocha, que me deu todo apoio emocional para me manter firme na missão de concluir o mestrado. Ao meu namorado, companheiro de vida, André Duarte, pela paciência, apoio e auxílio em todos os momentos, sempre me incentivando e me fazendo acreditar ser capaz.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), ao Centro de Tecnologia (CTEC) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento (PPGRHS).

Agradeço ao meu orientador Prof. Doutor Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim, pela confiança, paciência e auxílio nas pesquisas e trabalhos.

Ao meu coorientador Dr. Anderson Marafon por todo o auxílio científico que colaborou para o produto final apresentado.

À Prof. Dra. Daniele Vich que inicialmente foi minha coorientadora e agora avaliadora, pela paciência, auxílio no projeto de pesquisa.

A aluna Ana Beatriz pela contribuição da pesquisa realizada.

Aos amigos de mestrado Fausto Diniz, Ana Luiza Castro e Amanda pelas palavras de apoio e ajuda. Eles que compartilharam os momentos bons e ruins do mestrado.

A amiga Thais Peixoto, que foi um dos grandes presentes do mestrado, sempre solidária em todos os momentos de dúvidas, ficará como amiga para a vida.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SILVA, O. E. R. **Produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de capim-elefante com vinhaça em reator em batelada.** 2020. 73 f. Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2020.

Este estudo teve como objetivo determinar a produção de biogás a partir da co-digestão do capim-elefante e vinhaça, utilizando biodigestor em batelada e lodo de reator UASB tratando efluentes domésticos, como inóculo. O capim-elefante foi testado na forma de caldo, prensado com concentração de DQO da ordem de 8.534,21 mg/L. O caldo foi misturado à vinhaça, que apresentou cerca de 30.000 mg/L de DQO, em diferentes proporções %v/c (A - 25/75, B - 50/50, C - 75/25, D - 100/0, E - 0/100) no ensaio I. Além disso, foi testado o efeito da diluição dos substratos, como também a adição de alcalinizante às condições que apresentaram a maior produção de metano (ensaio II). Foram utilizados reatores de 106 mL e bicarbonato de sódio como alcalinizante em diferentes concentrações. O rendimento da co-digestão do biogás foi avaliado para as proporções de mistura e para cada um dos substratos separadamente, o rendimento de produção de metano acumulou valores de 7,63 – 370,94 mL_{CH₄}/g_{SV} e foi possível verificar que, dentre as condições experimentais avaliadas, a proporção B - 50/50 apresentou a maior produção de biogás acumulada chegando a 370,94 mL_{CH₄}/g_{SV}. As condições experimentais testadas no ensaio II apresentaram valores maiores de produção de metano que o ensaio I. A avaliação do potencial metanogênico faz parte de um projeto de pesquisa realizado junto a outras instituições do país, com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa em Agropecuária (EMBRAPA). O trabalho atual pode fornecer informações para a otimização do projeto e operação, porém a produção de metano utilizando os substratos utilizados pode variar de acordo com as condições operacionais e concentrações estudadas.

Palavras-chave: co-digestão anaeróbia, metano, batelada, potencial metanogênico.

ABSTRACT

SILVA, O. E. R. **Biogas Production from anaerobic co-digestion of elephant grass and vinasse in batch reactor.** 2020. 73 f. Dissertation (master) –Postgraduate program in water resources and sanitation. Federal University of Alagoas, 2020.

This study aimed to determine the production of biogas from the codigestion of elephant grass and vinasse. Elephant grass was tested in the form of broth, with COD concentration of 8534,21 mg/L. The elephant grass broth was mixed with vinasse, which presented 30.000 mg/L of COD, in different proportions %v/c (A – 25/75; B – 50/50; C - 75/25, reactor D - 100/0, reactor E - 0/100). In addition, it was evaluated the effect of adding alkalizer to the mixture which presented the higher methane production. The volume of the reactor was 106 mL. The codigestion yield of the biogas was evaluated for the mixing ratios and for each of the indicated substrates. The yield of accumulated methane production in values of 7,63 – 370,94 mL_{CH₄}/g_{SV} and it was possible to verify the amount (%v/c) fo the B reactor (50/50) reached a higher methane production, reaching 370,94 mL_{CH₄}/g_{SV}. In addition, it is assumed that from the results obtained, that codigestion increases the accumulated methane production of reactors by 97,8%, when compared to the best and previous reactors. Mono digestion did not show significant methane production, being worse than broth of elephant grass, that accumulated 7,3 mL_{CH₄}/g_{SV} and the vinasse reached 88,335 mL_{CH₄}/g_{SV}. These values were followed after 40 days of operation and recorded COD removal efficiencies of up to approximately 80%. Among the reactors tested, B reactor showed the highest accumulated biogas production. The evaluation of the methanogenic potential is part of a research project carried out with other institutions around the country, with the support of the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA). The current work can provide information on the optimization of the design and operation, however the production of methane using the substrate may vary according to the conditions and statistics studied.

Keywords: anaerobic codigestion, methane, batch, methanogenic potential.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 Aspectos gerais da vinhaça.....	18
3.2 Aspectos gerais do capim- elefante	21
3.3 Fundamentos da digestão e co-digestão anaeróbia.....	22
3.3.1 Digestão anaeróbia (DA)	22
3.3.2 Co-digestão anaeróbia (CODA)	25
3.4 Reator anaeróbio em batelada.....	27
3.4.1 Fatores que interferem no processo de DA	27
3.5 Produção Biológica de Biogás.....	28
4. METODOLOGIA.....	34
4.1 Procedimento experimental	34
4.1.1 Caracterização dos substratos e inóculo	34
4.1.2 Substratos e Inóculo	34
4.1.3 Ensaio em batelada.....	35
4.1.3.1 Ensaio I.....	35
4.1.3.2 Ensaio II.....	37
4.1.4 Acompanhamento e Monitoramento	38
4.1.5 Análises Finais.....	39
4.1.5.1 Análise Estatística dos dados.....	40
4.1.5.2 Avaliação metanogênica.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Ensaio I.....	42
5.1.1 Caracterização dos substratos	42
5.1.2 Avaliação do pH	43
5.1.3 Desempenho das condições experimentais.....	45
5.1.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis	46

5.1.5 Geração de biogás.....	48
5.1.5.1 Análise comparativa da produção de biogás acumulada.....	48
5.1.5.3 Avaliação da atividade metanogênica	50
5.2 Ensaio II.....	53
5.2.1 Caracterização dos substratos.....	53
5.2.2 Análise geral e comparativa das condições experimentais do ensaio I e II.....	54
6. CONCLUSÃO.....	61
REFERÊNCIAS	63
ANEXO A - Resultados cromatografia (Ensaio I)	71
ANEXO B- Resultados cromatografia (Ensaio II).....	80
ANEXO C- CURVA DE METANO.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo produtivo do etanol a partir da cana-de-açúcar.	19
Figura 2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	25
Figura 3 - Fluxograma da co-digestão.....	26
Figura 4 - Montagem do reator em batelada testado no primeiro ensaio.	37
Figura 5 - Variação do pH inicial e final para cada condição no ensaio I. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).	44
Figura 6 - Eficiência de remoção de DQO (Ensaio I). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	45
Figura 7 - Variação de Sólidos Totais inicial e final. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	46
Figura 8 - Variação da concentração de Sólidos Fixos. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	47
Figura 9 - Variação de Sólidos Voláteis inicial e final. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	47
Figura 10 - Comparativo da produção de metano acumulado nas condições experimentais (Ensaio I). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	48
Figura 11 - Produção de metano acumulado no headspace ajustado à curva Gompertz. Ajuste da sigmóide para as condições experimentais. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	51
Figura 12 - Produção máxima de CH ₄ (mL) e tempo máximo para a produção de CH ₄ (dias) em função das condições experimentais. Produção máxima de produção (mL) (*), tempo máximo de produção (▲). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).	52
Figura 13 - Máxima taxa de produção CH ₄ (mL _{CH₄} /d) e tempo máximo para produção de metano (dias) em função de cada condição experimental. Máxima taxa de produção (*), tempo máximo de produção (▲). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).	52
Figura 14 - Variação do pH inicial e final para cada condição experimental no ensaio II. % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).....	54
Figura 15 - Eficiência de remoção de DQO para as condições experimentais (Ensaio II). % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).....	55
Figura 16 - Variação de Sólidos Voláteis inicial e final para cada as condições experimentais (Ensaio II). % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).	56
Figura 17 - Comparativo da produção de metano acumulada nas condições experimentais no ensaio II. % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).	57
Figura 18 - Comparativo da produção acumulada nas condições experimentais com 50% de vinhaça e 50% de caldo de capim elefante, dos ensaios I e II, com e sem adição de bicarbonato de sódio. % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25) e % V/C: B (50/50)	58

Figura 19 - Máxima taxa de produção CH₄ (mLCH₄/d) e DQO aplicada. Máxima taxa de produção (*) e DQO em g/L (▲) do ensaio I. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0). 59

Figura 20 - Máxima taxa de produção CH₄ (mLCH₄/d) e DQO aplicada. Máxima taxa de produção (*) DQO em g/L (▲) do Ensaio II. %V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25)..... 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Legislações relacionadas à disposição da vinhaça no meio ambiente.....	20
Tabela 2 - Estudos comparativos das condições operacionais usualmente utilizados na co-digestão anaeróbia para produção de biogás.	30
Tabela 3 – Análises realizadas.....	34
Tabela 4 - Proporção de caldo (C) e vinhaça (V) em porcentagem (v/c) para cada teste realizado na Ensaio I.....	36
Tabela 5 - Proporção de caldo (C), vinhaça e água (A) em porcentagem (V/C/A) para cada teste realizado na Ensaio II.....	38
Tabela 6- Equação do modelo não linear para ajuste à produção acumulada de biogás.	40
Tabela 7 - Características físico químicas dos substratos utilizados no experimento (Ensaio I).	42
Tabela 8 - Resultados físico-químicos iniciais das frações utilizadas no experimento..	43
Tabela 10 - Atividade metanogênica específica para cada condição experimental. A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).....	51
Tabela 10 - Características físico químicas dos substratos utilizados no experimento (Ensaio II). %V/C/A (alcalinizante): 50/0/50, 75/0/25, 0/50/50, 50/50/0 (0,05), 50/50/0 (0,11), 50/50/0 (0,25).....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMA – Atividade Metanogênica Aparente

AME – Atividade Metanogênica Específica

CCE – Caldo de Capim Elefante

CEH – Capim elefante hidrolisado

CSTR - *Continuous Stirred-Tank Reactor*

CODA – Co-digestão anaeróbia

DA – Digestão Anaeróbia

DQO – Demanda Química de Oxigênio

PBM – Potencial bioquímico de metano

pH – Potencial Hidrogeniônico

PBB - Potencial Bioquímico de Biogás

PBM - Potencial bioquímico de metano

rpm – Rotações por Minuto

ST – Sólidos Totais

SVT – Sólidos Voláteis Totais

SFT – Sólidos Fixos Totais

(TCO) - Taxas de Carregamento Orgânico

UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

%V/C – porcentagem de caldo de capim elefante e vinhaça

1 INTRODUÇÃO

A população mundial gera, atualmente, uma enorme quantidade de resíduos. Essa crescente geração se dá principalmente pelo aumento do desenvolvimento socioeconômico da população. Deste modo, estudos sobre gerenciamento de resíduos e seu potencial energético por meio de novas tecnologias merecem atenção, uma vez que representam um método de aproveitamento destes materiais e redução dos efeitos de poluição que podem causar (DAMRONGSAK; CHAICHANA; WONGSAPAI, 2017; GAO *et al.*, 2019).

A biomassa é uma fonte de energia renovável que pode substituir combustíveis fósseis (FERREIRA *et al.*, 2018). Uma das vantagens da produção de energia proveniente de biomassa é o menor investimento requerido ao se comparar com outras energias renováveis como solar e eólica (RAO *et al.*, 2010). Os principais substratos utilizados na produção de biogás incluem os resíduos de águas residuárias, industriais e agroindustriais.

A indústria sucroalcooleira, de biodiesel, laticínios, mandioca, citros, cervejas, matadouro, celulose e papel fazem parte de maneira expressiva da produção de resíduos (FERREIRA *et al.*, 2018). Diante disso, considerando o volume produzido, os resíduos agroindustriais têm um maior potencial de contaminação do meio ambiente se dispostos de maneira inadequada (MOMAYEZ; KARIMI; TAHERZADEH, 2019; PARSAAE; KIANI DEH KIANI; KARIMI, 2019; YONO *et al.*, 2014).

A produção de biogás pode ser realizada por meio da digestão anaeróbia (DA), como alternativa para o aproveitamento energético; a DA é um processo de conversão de matéria orgânica na ausência de oxigênio. A utilização de resíduos sólidos orgânicos de origem agrícola, biomassa e esterco animal para produção de bioenergia através da digestão anaeróbia já é largamente utilizada. E juntamente com a demanda pela utilização dessa tecnologia, há a necessidade de avaliação do potencial de produção de biogás para diferentes tipos de substratos (ANGELIDAKI *et al.*, 2009; PARSAAE; KIANI DEH KIANI; KARIMI, 2019).

Com a perspectiva de aumento na produção de cana-de-açúcar e de etanol nos próximos anos, no Brasil, favorecida pelos incentivos da Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio), Lei 13.576 de 26 de dezembro de 2017, cresce a necessidade de aproveitamento da vinhaça da cana-de-açúcar. A produção brasileira anual de etanol é de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos, sendo que, para cada litro de etanol produzido são gerados cerca de 12 litros deste efluente industrial. Neste cenário, nota-se o imenso potencial de aproveitamento da

vinhaça de cana-de-açúcar para a produção de biogás, bioeletricidade e biofertilizantes (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017).

Existe um crescente interesse no uso desses compostos para a produção de energia. Um tipo de resíduo agroindustrial largamente produzido no Brasil é a vinhaça de cana-de-açúcar, coproduto da fabricação do etanol. Diversos estudos têm se dedicado à avaliação do potencial bioquímico do metano (PBM) da vinhaça. Moraes; Zaiat; Bonomi, (2015) chegaram a valores de $267,4 + 4,5 L_{CH_4}/kg_{SV}$ e detectaram uma diminuição na produção de biogás quando apenas vinhaça foi adicionado ao reator. Além da grande geração de vinhaça proveniente da cana-de-açúcar, atualmente grandes quantidades de resíduos agrícolas são geradas durante as safras e muitas vezes não é possível gerenciar esses resíduos de maneira tradicional, como queimar no campo ou através da decomposição natural. Ademais, resíduos como palha de trigo, milho, resíduos de soja, entre outros, têm grande potencial de produção de biogás (HESAMI *et al.*, 2015; KAPOOR *et al.*, 2017).

A vinhaça de destilarias brasileiras, usando caldo de cana e/ou melaço, é rica em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio e, normalmente, é aplicada sobre os canaviais na fertirrigação. Além destes nutrientes, a vinhaça contém compostos orgânicos (ácidos orgânicos, álcoois, glicerol) que são convertidos em metano por bactérias anaeróbias. A quantidade de biogás produzido a partir de $1 m^3$ de vinhaça varia entre 7 e $15 Nm^3$. Isso corresponde a 37~78 kW de energia térmica ou 17~37 kW de energia elétrica. A produção de biogás depende da concentração de DQO (demanda química de oxigênio) na vinhaça. Considerando-se uma vinhaça com concentração de DQO de 30 g/l, o volume de reator necessário para tratar cada $1 m^3$ /dia de vinhaça pode variar de $3 m^3$ (UASB) até $15 m^3$ (lagoa). Assim, para cada mil litros de vinhaça podem ser produzidos $10.000 m^3$ de biogás, sendo 4,5 a $5,2 m^3$ de gás carbônico e de 7,8 a $8,5 m^3$ de metano (TORQUATO; JESUS, 2015). O biogás pode ser empregado como combustível para movimentar turbinas para a geração de energia elétrica via combustão do gás produzido e/ou para a produção de metano, sendo que, neste caso, biodigestão só é possível com a adoção de reatores de alta eficiência, a exemplo do Reator Anaeróbio UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestion) (GRANATO, 2003).

A digestão anaeróbia utiliza usualmente apenas um substrato. No entanto a utilização de mais de um substrato, em um processo conhecido como co-digestão anaeróbia, pode resultar em maior produção de biogás (SCARLAT; DALLEMAND; FAHL, 2018; SIDDIQUE; WAHID, 2018a). Com isso, a digestão de dois ou mais substratos tem sido aplicada para potencializar a

produção de biogás e balancear as desvantagens da utilização de apenas um substrato (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

Muitas culturas agrícolas têm potencial de utilização como substrato para a produção de biogás, i.e. cana-de-açúcar, sorgo, capim-elefante, entre outros. Alguns parâmetros importantes para escolha são o alto teor de nutrientes e a forma de cultivo. O capim-elefante é uma espécie cultivada que possui alto teor de nutrientes como carboidratos e proteínas e é fácil de cultivar, uma vez que é capaz de crescer em solo de baixa qualidade (LEHTOMÄKI, 2006; SAWASDEE; PISUTPAISAL, 2014b).

Estudos com diversas gramíneas semiperenes usadas como culturas energéticas vêm sendo realizados em diversos países e observa-se que tais plantas diferem quanto ao potencial produtivo, às propriedades físico-químicas da biomassa, às demandas ambientais e às necessidades de manejo. As mais estudadas nos Estados Unidos e na Europa são: *Panicum virgatum* (Switchgrass), *Miscanthus* spp. (Miscanto), *Phalaris arundinacea* (capim amarelo) e *Arundo donax* (cana-do-reino). No Brasil, o capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) tem sido alvo desses estudos, sendo a maior parte deles com foco na sua utilização como combustível sólido, principalmente para produção de pellets, bioeletricidade, biogás e/ou etanol celulósico (FONTOURA; BRANDÃO; GOMES, 2015; MARAFON, 2017; QUESADA *et al.*, 2004; ROCHA *et al.*, 2017)

O capim-elefante (*P. purpureum*) é uma espécie perene de propagação vegetativa, que apresenta ciclo curto (5 e 7 meses), alto índice de perfilhamento, rápido crescimento e expansão foliar nos primeiros meses após o plantio ou corte. O capim-elefante desenvolve-se melhor em áreas com precipitações acima de 1000 mm anuais e temperatura variando de 30 a 35°C (HANNA *et al.*, 2004). Suas rebrotas são capazes de se manterem viáveis por mais de 5 anos, dependendo do manejo agrônômico e das condições edafoclimáticas de cada região (LIRA *et al.*, 2010).

Partindo do pressuposto da avaliação de outras biomassas agrícolas, como fonte alternativa de substrato para ampliar a oferta de matéria-prima e aperfeiçoar a produção de biogás a partir da vinhaça, o capim-elefante pode ser visto como opção, em decorrência da sua alta produtividade de biomassa e da viabilidade locacional, tendo em vista sua ampla distribuição e boa adaptação em todo o território nacional brasileiro (FAVARE *et al.*, 2019).

Portanto, levanta-se o questionamento sobre a possibilidade de potencializar a produção de biogás a partir da mistura de resíduos de atividades agrícolas, como a vinhaça (amplamente

estudada) e o caldo do capim elefante (CCE), espécie forrageira altamente promissora para a produção de biomassa energética.

Dessa forma, o potencial de produção de biogás em diferentes proporções da mistura vinhaça e capim-elefante (resíduos agroindustriais) foi investigado neste trabalho, como parte integrante de um projeto de pesquisa nacional liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) denominado: Melhoramento genético de capim-elefante: desenvolvimento de cultivares e indicações de uso para produção de biomassa energética – Capim Energia Fase II (20.18.01.016.00.00), em parceria com outras instituições, incluindo a Universidade Federal de Alagoas, o qual contempla uma de suas atividades focada especificamente no tema desta dissertação que é a produção de biogás a partir de misturas de caldo de capim-elefante com vinhaça de cana-de-açúcar.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia do caldo de capim-elefante e vinhaça em reatores em batelada.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a produção de biogás a partir das condições experimentais testadas;
- Avaliar o efeito da diluição da vinhaça e caldo de capim elefante nas condições experimentais;
- Avaliar o efeito da adição de alcalinizante na produção de biogás;

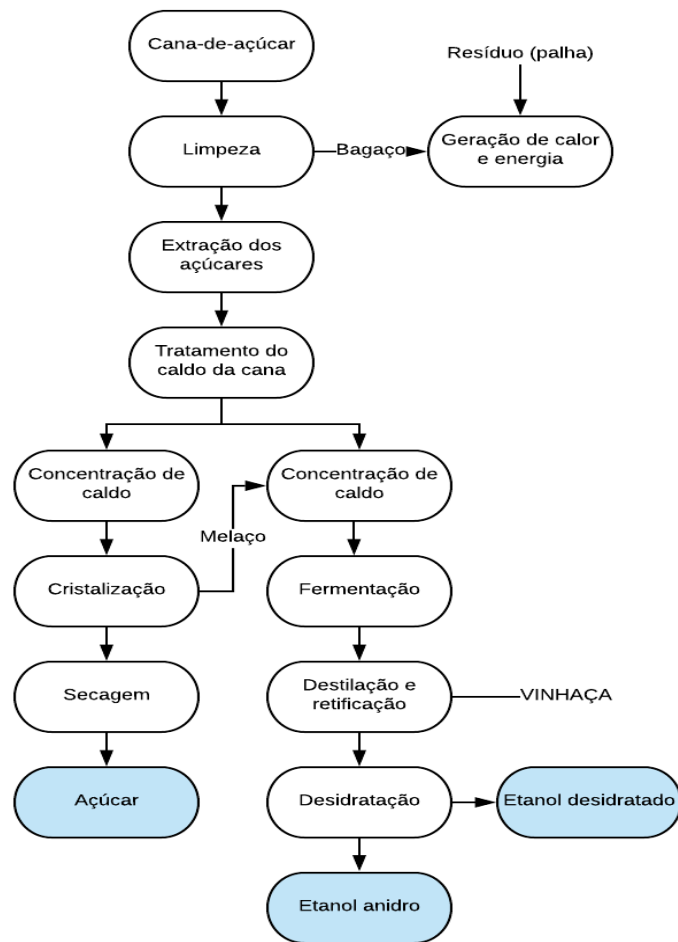
3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais da vinhaça

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e a produção de etanol do país é proveniente em sua maioria dessa cultura. Estima-se a geração de 13 L de vinhaça para cada litro de etanol produzido (ESPAÑA-GAMBOA et al., 2011). Portanto, segundo a estimativa de 2018 realizada, a safra 2018/2019 produziu cerca de 32 bilhões de litros de etanol litros (CONAB, 2018). O que significa um volume de aproximadamente 416 bilhões de litros de vinhaça produzidos nessa safra em todo o país.

O etanol de primeira categoria produzido no Brasil possui diferentes tipos de processamento, pode ser produzido a partir do caldo da cana ou melaço (e até mesmo por uma mistura de ambos) (MORAES et al., 2015). Um esquema da produção de açúcar e etanol de primeira geração em destilarias autônomas está ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 1- Processo produtivo do etanol a partir da cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015.

A vinhaça (subproduto da fabricação de etanol) pode ser considerada a maior fonte de contaminação na indústria de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. A vinhaça geralmente contém alto teor de poluentes, caracterizado principalmente por seu baixo pH, alta capacidade de corrosão e grande conteúdo de matéria orgânica. Este resíduo é considerado muito poluente devido à presença de alta carga orgânica que causa a proliferação de microrganismos que consomem o oxigênio dissolvido na água, causando danos à disponibilidade de água potável, além do pH muito baixo (LAIME et al., 2011). É um resíduo com alto potencial para produção de biogás. Esta é também utilizada como fertilizante (PARSAEE; KIANI DEH KIANI; KARIMI, 2019).

A disposição exagerada de vinhaça no solo pode causar danos ambientais, como contaminação das águas subterrâneas com potássio, salinização do solo, lixiviação de metais e sulfatos, liberação de mau cheiro e emissões de gases de efeito estufa tal qual o óxido nitroso (N₂O), que é cerca de 300 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO₂). A digestão anaeróbia (DA)

ou a biodigestão pode ser considerada a principal alternativa para o gerenciamento da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar. A DA tem vantagens importantes sobre a fertirrigação, incluindo redução na carga orgânica poluidora da vinhaça, potencial recuperação da bioenergia a partir do biogás e potencial para aumentar a lucratividade das biorrefinarias por meio da geração de excedente de eletricidade, com base na queima do biogás (FUESS *et al.*, 2018; MARAFON *et al.*, 2020).

Existem diferentes alternativas para o descarte de vinhaça. Uma das práticas mais usuais é a utilização como fertilizante, na aplicação no solo de culturas de cana-de-açúcar, comumente denominada de fertirrigação. No entanto, não existe no Brasil regulação da composição química da vinhaça para aplicação no solo permite que a fertirrigação com vinhaça *in natura*, sendo esta prática fonte de potenciais impactos ambientais (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seguir dispõe um resumo das legislações relacionadas à disposição da vinhaça no meio ambiente.

Tabela 1 - Legislações relacionadas à disposição da vinhaça no meio ambiente.

Legislação	Descrição
Portaria/GM nº 323 de 1978	Proíbe o lançamento direto ou indireto do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham se instalar no País
Portaria nº 158 de 1980	Proíbe o lançamento de vinhaça nos mananciais superficiais
Resolução CONAMA nº 02 de 1984	Dispõe sobre a poluição causada pelos efluentes das destilarias de álcool
Resolução CONAMA nº 01 de 1986	Obriga novas indústrias instaladas a realizar a avaliação de impacto ambiental (AIA) e seu respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA)
Norma técnica P4.231 CETESB de 2006	Estabelece critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça no solo agrícola

Fonte: Adaptado de Barbosa, (2017).

A Norma Técnica da CETESB P4.231/2006, estabelece alguns critérios para aplicação deste subproduto no solo de propriedades agrícolas, determinando limites máximo apenas para concentrações de Potássio, característica relacionada aos possíveis impactos gerados no solo, água e lençol freático. No entanto, não há menção ao teor de matéria orgânica presente e aos possíveis impactos decorrentes de poluição atmosférica (CETESB, 2006).

A vinhaça tem pH variando de 4,5 a 5,5 e, portanto, demonstra característica de efluente ácido (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000). A literatura demonstra que os principais constituintes da vinhaça são o etanol, glicerol, ácido acético e ácido láctico. Além disso, há alta concentração de ferro, manganês, zinco e cobre. A cor escura do efluente se deve a altas concentrações de melanoidinas e compostos fenólicos, que podem interferir na atividade microbiana (FITZGIBBON et al., 1998; NETO, 2008; PARNAUDEAU et al., 2008).

A vinhaça é rica em matéria orgânica e em nutrientes como potássio, manganês, ferro, alumínio, cloreto, cálcio, enxofre, entre outros. Logo, possui elevado potencial contaminante das águas superficiais e subterrâneas, quando disposto de maneira inadequada em solos e corpos hídricos (HASSUDA; REBOUÇAS; CUNHA, 2013; NOGUEIRA et al., 2015).

3.2 Aspectos gerais do capim- elefante

O capim-elefante é, reconhecidamente, uma das gramíneas forrageiras de mais alto potencial produtivo, adaptando-se muito bem às condições de clima e solo de praticamente todo o Brasil. Trata-se de uma espécie semiperene que apresenta rápido crescimento, com alto índice de perfilhamento e elevada eficiência fotossintética (metabolismo C4) com grande acúmulo de matéria seca (40-45 t ha⁻¹ ano⁻¹); além de boa capacidade de rebrota, de translocação de nutrientes das raízes no final do ciclo vegetativo e de otimização do uso da água do solo e da energia solar (SAMSON et al., 2005).

Originário da África Tropical, estima-se que o capim-elefante deve ter sido introduzido no Brasil em 1920, no estado do Rio Grande do Sul, foi amplamente disseminado pelo seu elevado potencial de produção e pela sua resistência às secas e queimadas. O capim-elefante apresenta um colmo fibroso, mais dura, que forma uma casca, características de uma monocotiledônea. Possui bastante semelhança com o bagaço da cana-de-açúcar (ABBADO, 1995).

É uma espécie forrageira com grande potencial produtivo e encontra-se distribuída por todo o país (REIS, 2005). Muito plantada nos trópicos úmidos do mundo, chega a produzir 45 toneladas de massa seca por hectare em um ano, sendo espécie promissora para a produção de

energia por possuir elevada produção de biomassa com características qualitativas semelhantes ao bagaço de cana e por representar uma alternativa de plantio durante a entressafra da cana-de-açúcar (MARAFFON *et al.*, 2017).

Além do seu tradicional uso forrageiro, o capim-elefante tem sido apontado como alternativa sustentável de biomassa¹ para utilização como insumo energético (ANDERSON; CASLER; BALDWIN, 2008), sobretudo em função seu elevado percentual de fibras e lignina e alto poder calorífico (QUESADA *et al.*, 2004), podendo ser usado na produção de carvão vegetal, pellets e/ou briquetes, como cama para aviários, entre outros (PEREIRA *et al.*, 2010).

Algumas das vantagens do uso de capim-elefante para a produção de biomassa são a alta produtividade, rápido crescimento e maior assimilação de carbono (C:N>100). Diante do exposto, o capim-elefante apresenta um alto potencial para uso não só como fonte de energia, mas, também, na produção de carvão vegetal (HUANG *et al.*, 2019; SEGUCHI *et al.*, 2017; ZIEGLER; BIANCHIN, 2019).

Várias culturas vêm sendo estudadas como alternativas para a geração de energia a partir da biomassa, dentre essas está o capim-elefante, uma vez que possui diversas características adequadas para o processo, além da produção de biomassa (MOMAYEZ; KARIMI; TAHERZADEH, 2019; MORAIS, 2010).

A alteração da digestão anaeróbia no estado sólido para a DA no estado líquido da biomassa lignocelulósica pode superar problemas: fácil acidificação, baixa eficiência de transferência de massa, longo período de ativação, entre outros, e, assim, tornar a digestão anaeróbia mais atrativa para o tratamento biológico de resíduos lignocelulósica. No entanto, para tornar essa tecnologia mais adequada para aplicação industrial, mais atenção deve ser dada para aspectos como a necessidade de adicionar nutrientes extras, como fontes de nitrogênio e fósforo, para melhorar a eficiência da digestão anaeróbia e manter o processo em situação estável (BEDOÍĆ *et al.*, 2019; HUANG *et al.*, 2019; SAWASDEE; PISUTPAISAL, 2014a).

3.3 Fundamentos da digestão e co-digestão anaeróbia

3.3.1 Digestão anaeróbia (DA)

A digestão anaeróbia consiste num processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio livre e, assim, oxida os compostos presentes no efluente. O tratamento biológico tem como principal

¹ A biomassa é a definição dada a todo material orgânico originado de plantas, é produzida a partir de plantas com clorofila, que transformam energia solar em matéria vegetal (CARVALHO, 2014).

objetivo transformar os compostos biodegradáveis dissolvidos e particulados, como também remover compostos orgânicos específicos (METCALF & EDDY, 2016)

Além disso, este processo pode ser utilizado para produção de biogás a partir dos materiais biodegradáveis já citados e representam um processo biológico sequencial, com múltiplos estágios para decomposição e estabilização de matéria orgânica na ausência de oxigênio (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

A matéria orgânica encontrada em efluentes pode ser convertida, através do processo de DA, em biogás, que representa fonte de energia renovável. O biogás é uma mistura de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), que pode ser usado como um substituto para combustível fóssil para gerar calor ou eletricidade (WU *et al.*, 2019). Outros gases também podem ser convertidos, mas em menores quantidades, como nitrogênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e vapor d'água (NESHAT *et al.*, 2017).

As publicações sobre o monitoramento dos processos da digestão anaeróbia tiveram um aumento constante de 2008 a 2017, o que evidencia uma atenção relacionada ao tema, com a finalidade de estabilizar reatores anaeróbios e os seus processos e assegurar o crescimento da eficiência de produção de biogás (WU *et al.*, 2019).

O processo de digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases principais, iniciando pela hidrólise; acidogênese; acetogênese e metanogênese.

Na hidrólise, o material orgânico encontrado na forma de material particulado é transformado em forma dissolvida, em menor peso molecular. Neste ensaio os carboidratos são convertidos em açúcares solúveis e os lipídios em ácidos graxos de longa cadeia de carbono e glicerina (PROSAB, 1999).

Os produtos gerados na fase acidogênica, são importantes substratos para as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas. Esta fase é realizada pela atividade de um grupo de bactérias fermentativas, sendo as mais comuns em reatores anaeróbios: *Clostridium*, *Bactroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (CHERNICHARO, 1997).

Na fase da acetogênese ocorre a oxidação dos produtos gerados na acidogênese em substrato próprio para as bactérias metanogênicas. As bactérias atuam como intermediárias dos processos de acidogênese e metanogênese, formando hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Neste

ensaio o pH decresce muito devido à formação dos ácidos acético e propiônico. Os íons H^+ na solução são consumidos através das bactérias metanogênicas que consomem o hidrogênio e o gás carbônico para formar metano através de ácidos orgânicos que são formados na reação entre hidrogênio e dióxido de carbono (COSTA, 2014).

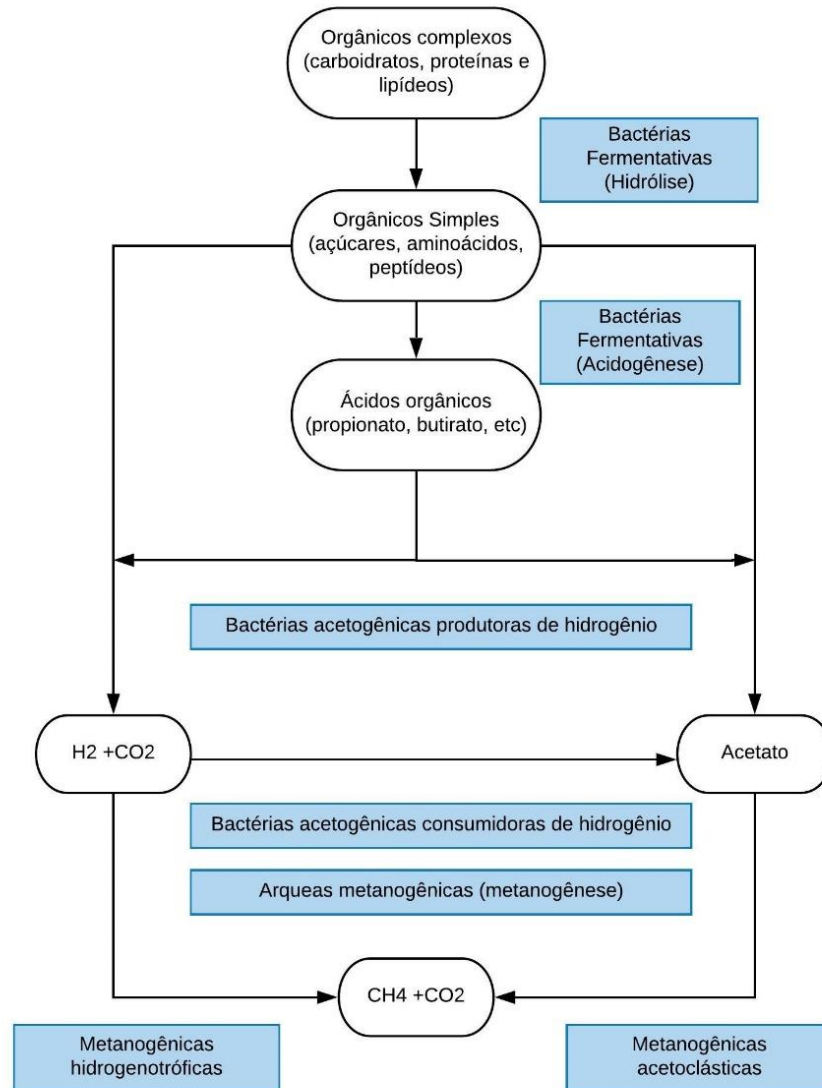
A metanogênese é a última etapa na produção de biogás e formação de metano. As bactérias metanogênicas, convertem o hidrogênio, dióxido de carbono e o ácido acético em metano. Nesta ensaio os microrganismos do domínio *Arquea* são considerados únicos, já que são produtores obrigatórios de metano e, ainda, a produção de metano é obrigatoriamente anaeróbia, não há conversão na presença de oxigênio (LYU *et al.*, 2018).

A partir da fisiologia das arqueas metanogênicas, pode-se dividir estes microrganismos em dois grupos principais (CHERNICHARO, 1997):

- Metanogênicas acetoclásticas – produzem gás carbônico CO_2 e metano (CH_4) a partir de ácido acético ou metanol;
- Metanogênicas hidrogenotróficas – produzem metano (CH_4) a partir de hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2);

A Figura 2 apresenta as rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia.

Figura 2 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: Chernicharo, 1997, adaptado de Lettinga et al, 1996.

3.3.2 Co-digestão anaeróbia (CODA)

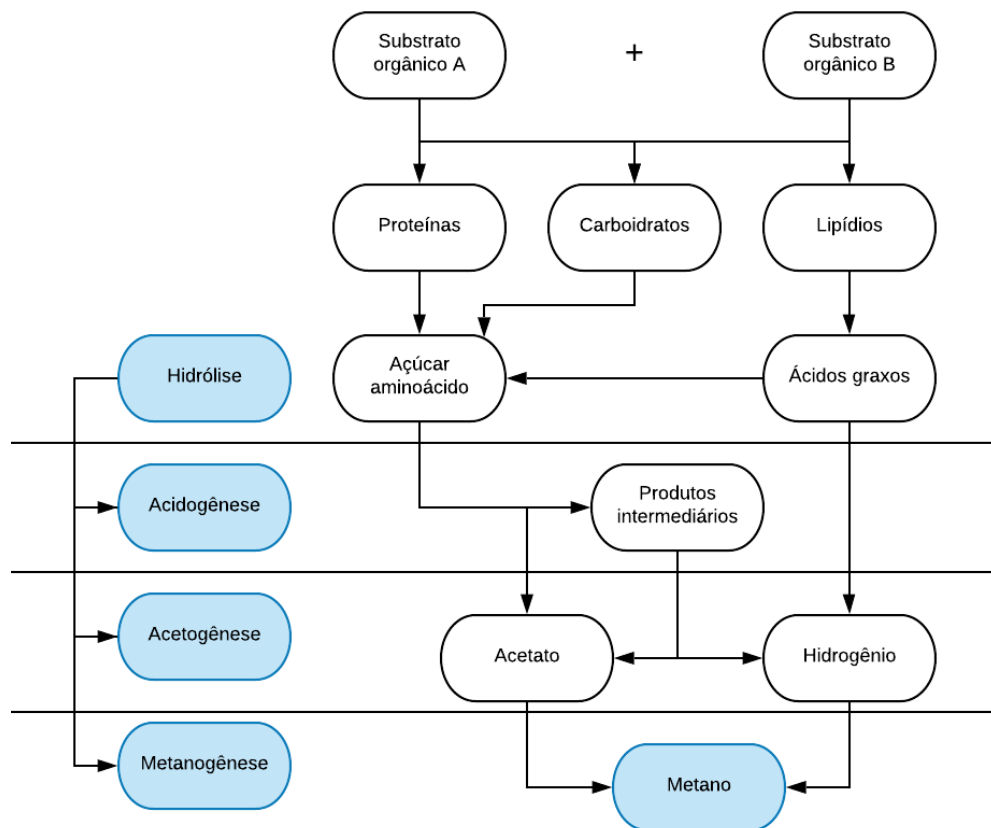
Os benefícios da co-digestão são inúmeros. É uma tecnologia simples, que pode trazer vantagens como redução da concentração de compostos tóxicos, melhor carregamento de substrato biodegradável, melhora na taxa de digestão e aumento da produção de biogás (BEDOÍĆ *et al.*, 2019; COOK *et al.*, 2017; NESHAT *et al.*, 2017)

Para a otimização da produção de biogás no processo de co-digestão, é necessário manutenção de condições estáveis. Desse modo, a observação de alguns parâmetros principais de funcionamento, como temperatura, pH, tamanho das partículas, relação C/N, dentre outros, são

importantes para maximizar o desempenho dos microrganismos presentes no sistema para a produção de biogás (SIDDIQUE; WAHID, 2018a).

Um fluxograma esquemático do processo de co-digestão anaeróbia é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma da co-digestão



Fonte: Adapado de Siddique; Wahid, (2018b)

A escolha do processo de co-digestão traz benefícios ao processo em relação a monodigestão. Dois ou mais resíduos, quando operados adequadamente, aumentam a produção de biogás (de 25 a 400% em relação a monodigestão dos mesmos substratos) e diluem a toxicidade do substrato (SHAH *et al.*, 2015).

Entretanto, a escolha ineficaz do substrato a ser utilizado pode levar instabilidade ao processo, podendo ocasionar a redução da produção de metano (XIE *et al.*, 2016).

Portanto, a escolha dos substratos para a co-digestão deve estar relacionada principalmente às propriedades químicas dos resíduos. Todos os substratos derivados de planta são ricos em carboidratos e, apesar de ser difícil de degradar, a celulose demonstra um grande potencial para produção de biogás. E resíduos da produção de etanol têm grande concentração de proteínas,

que podem produzir uma quantidade significativa de metano durante o processo (MUROVEC; KOLBL; STRES, 2015; SIDDIQUE; WAHID, 2018b; ZOU *et al.*, 2010).

A co-digestão anaeróbia vem sendo amplamente utilizada no setor rural devido à necessidade de melhorar a eficiência dos digestores para produção de biogás. Logo, para a escolha do substrato, é necessário avaliar também pontos como proporção entre substratos e suas composições, otimização da produção de biogás, entre outros (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

3.4 Reator anaeróbio em batelada

Sendo o reator em batelada, um tipo de sistema onde não há entrada ou saída de fluxo a partir da partida do processo, os elementos ali encontrados são expostos a um tempo de permanência igual ao do substrato (VON ESPERLING, 1996).

O crescimento bacteriano ocorre conforme o reator em batelada entra em operação e o substrato é consumido. Este crescimento é caracterizado por quatro fases sequenciais e distintas: (i) fase *lag* (retardo), necessária para os microrganismos se aclimatarem, antes da divisão celular e produção de biomassa, (ii) fase de crescimento exponencial, nesse ensaio as células das bactérias tendem a se multiplicar em taxas máximas, (iii) fase estacionária, após os ensaios anteriores à concentração de biomassa tende a permanecer constante ao longo do tempo, (iv) fase de morte, nesta última fase o substrato foi consumido e ocorre um declínio da concentração de biomassa (METCALF & EDDY, 2016).

Em processos de digestão anaeróbia, a remoção eficaz de poluentes e contaminantes depende não só do potencial metabólico dos microrganismos presentes no sistema, como também da existência de condições adequadas que permitam a sua atividade.

3.4.1 Fatores que interferem no processo de DA

A digestão anaeróbia é diretamente afetada por alterações de pH. A manutenção de uma faixa adequada de pH possibilita o melhor desenvolvimento dos microrganismos, isso se dá devido ao pH estar diretamente correlacionado às concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio (SALOMON, 2007).

A queda do pH pode ocasionar um desequilíbrio devido ao acúmulo de ácidos orgânicos. A faixa de pH ideal para o desenvolvimento dos microrganismos deve ficar entre 7 e 8,5. Valores fora dessa faixa podem ocasionar o decréscimo da produção de metano (HOLLIGER *et al.*, 2016).

O processo de digestão anaeróbia acontece em diferentes faixas de temperatura, são estes: Regime Psicrófilo (< 20 °C), Regime Mesófilo (25-40 °C) e Regime Termófilo (45-60 °C).

O aumento da temperatura pode apresentar um efeito positivo na taxa metabólica dos microrganismos. Contudo, também acarreta o aumento da concentração da amônia (NH₃) que pode levar à inibição da digestão anaeróbia (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008). Portanto, o controle operacional da temperatura é de grande valia para o bom funcionamento do processo.

A temperatura utilizada no processo de digestão pode influenciar a atividade biológica dos microrganismos e a velocidade do processo de degradação dos compostos (ANGELIDAKI, 1994).

A concentração adequada de nutrientes no meio reacional é importante para que a digestão anaeróbia ocorra de maneira eficiente. Os processos biológicos necessitam de nutrientes essenciais como fósforo e nitrogênio e a relação entre a quantidade de nutrientes presentes e a matéria orgânica depende da eficiência das reações de oxidação do substrato utilizado. (BOHRZ, 2010; MEYSTRE, 2007).

A agitação adequada do digestor é fundamental para o funcionamento ótimo do processo de digestão anaeróbia. Geralmente, os reatores são misturados para garantir a transferência eficiente de material orgânico para a biomassa microbiana ativa, para liberar bolhas de gás presas no meio e para evitar a sedimentação de material particulado mais denso (WARD *et al.*, 2008).

Em diversos estudos efetuados em digestores sob regime de agitação, concluiu-se que a intensidade de agitação do líquido em digestão tem influência na inibição do processo, assim como na sua recuperação após um desequilíbrio causado por sobrecarga orgânica (KARIYAMA; ZHAI; WU, 2018).

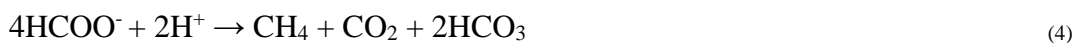
3.5 Produção Biológica de Biogás

O biogás é gerado como resultado do processo fermentativo da digestão anaeróbia. Pode servir como energia limpa a fim de reduzir as emissões e substituir o uso de fontes de energia fósseis que são utilizadas em atividades domésticas e/ou comerciais (RAMOS-SUÁREZ *et al.*, 2019; WEILAND, 2010; ZHANG; LOH; ZHANG, 2018).

Quando os microrganismos são bem-sucedidos no processo de digestão anaeróbia, o biogás é obtido com cerca de 70 a 80% do volume total consistindo em metano, enquanto os 20 a 30%

restantes consistem, principalmente, em gás carbônico e quantidades menores de outros gases (CHERNICHARO, 1997).

A metanogênese é um fenômeno complexo realizado pela ação sinérgica de várias espécies bacterianas mesofílica, estes processos são realizados através das equações (Eq. [1]-[5]) a seguir (LI; CHEN; WU, 2019):



A Tabela 2, a seguir, apresenta a comparação entre diversos estudos de co-digestão visando avaliar a produção de biogás.

Tabela 2 - Estudos comparativos das condições operacionais usualmente utilizadas na co-digestão anaeróbia para produção de biogás.

Referência	Reator	Substrato e concentrações	Inóculo	Controle operacional
(ZOU et al., 2010)	Batelada V: 1000 mL	Capim (S; alterniflora) Esterco bovino	Lodo de digestor anaeróbio	T: 35 ± 1 °C Sem agitação
(WILAWAN; PHOLCHAN; AGGARANGSI, 2014)	Completely Stirred Tank (CST) V: 25L	Capim Pakchong 1 Resíduo de Cama de frango	Lodo de digestor anaeróbio (Esterco bovino)	T: ambiente -
(CREMONEZ et al., 2015)	RALF V: 10 L	Resíduo de suinocultura Vinhaça	-	T: 37° C e ambiente -
(CARVALHO et al., 2016)	<i>Continuous Stirred-Tank Reactor (CSTR)</i> V: 12 L	Lodo de ETE Capim-elefante	-	T: 37 ± 0,2 °C -
(HIMANSHU et al., 2018)	Batelada V:160 mL	Silagem de capim Resíduo de suinocultura Resíduo de bovinocultura	Lodo de digestor UASB	T: 37 °C Agitação manual 1x por dia
(BEDOÍĆ et al., 2019)	Batelada V: 250 mL	Lodo bovino Silagem de milho Capim ribeirinho	Lodo de digestor anaeróbio	T: 39 °C Agitação manual (20 s/d)
(KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019)	Batelada V: 1000 mL	Palha de arroz <i>Hydrilla verticillata</i>	Esterco bovino digerido	T: 37 ± 0,2 °C Agitação manual 2x por dia
(PANIGRAHI; SHARMA; DUBEY, 2020)	Batelada V: 1000 mL	Resíduo de poda Resíduo orgânico	Lodo de digestor de Lodos Ativados	T: 30 °C Agitação manual 1x por dia

Fonte: O autor (2020)

ZOU et al., (2010) tiveram como objetivo avaliar a produção de metano entre a mono-digestão de Capim (S; alterniflora) e a co-digestão do capim com esterco bovino. Utilizou reatores em batelada com volume útil de 1000 mL, com temperatura controlada de 35°C. O experimento foi operado por 54 dias. Foram avaliadas a mono-digestão e a co-digestão nas proporções de 0:100/ 12,5:87,5/ 25:75/ 50:50/ 75:25/ 87,5:12,5/ 100:0. A co-digestão aumentou a produção de

metano em até 44,26% para a proporção de 75:25, em relação à mono-digestão, que produziu 0,176 L_{CH₄}/g_{VS}.

Wilawan; Pholchan; Aggarangsi, (2014) utilizaram Capim Pakchong 1 e Resíduo de Cama de frango na co-digestão anaeróbia em um reator do tipo *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR), com volume útil de 25 L, visando à produção de biogás. Foram examinadas duas relações C/N (20 e 30) e quatro taxas de carregamento orgânico (TCO) de 1,1, 1,4, 1,7 e 2,2 kg VS/ (m³.d). Os resultados sugeriram a máxima produção de metano de 270 mL_{CH₄}/g_{VS} com relação C/N de 20 e TCO de 1,1 kg vs/ (m³.d).

Cremones *et al.*, (2015), realizaram a co-digestão de resíduos da suinocultura e vinhaça em biodigestor contínuo, com volume útil total de 10 L, sob diferentes temperaturas (um com temperatura ambiente e o outro com temperatura controlada de 37°C) para avaliar a remoção de DQO e sólidos, além da produção de biogás. O fator da temperatura influenciou principalmente a produção de biogás, em que o reator com temperatura controlada apresentou uma produção de metano maior, chegando em uma produção acumulada em torno de 20.000 mL ao final de 50 dias.

Carvalho *et al.*, (2016), utilizaram *Continuous Stirred-Tank Reactor* (CSTR) para avaliar a co-digestão visando à produção de metano. Os testes tiveram tempo de detenção hidráulica de 15 dias cada, em um reator contínuo com volume útil de 12 L. Os testes concluíram que o capim elefante digerido em reator contínuo obteve um efeito positivo na produção de metano. O aumento da proporção de capim elefante hidrolisado para 75:25 e 50:50 (%v/v) aumentou a produtividade de 23% e 62% respectivamente, comparado à mono-digestão.

Himanshu *et al.*, (2018), avaliaram a co-digestão de lodo de suinocultura e bovino com a silagem de capim, os testes foram realizados com dois substratos (lodo e capim), para avaliar a melhor produção de biogás. Foram utilizados reatores de 160 mL, as proporções testadas entre lodo e capim foram: 1:0/ 0,25:0,75 /0,50:0,50 /0,75:0,25/ 0:1. Foram utilizados dois tipos de lodo bovino, um tipo de lodo suíno e dois tipos de silagem de capim. Foi observado que a produção de biogás foi afetada de acordo com o tipo de lodo e silagem de capim utilizado. A produção de biogás para lodo bovino 1 e bovino 2 foram de 405,9 e 380,4 L/kg_{SV}, enquanto a produção para lodo suíno foi de 550,8 L/kg_{SV}. Já a silagem produziu para o tipo 1 e 2 um valor de 673,7 L/kg_{SV}, 610,6 L/kg_{SV}, respectivamente. O rendimento de metano para as misturas apresentou resultado não linear, e a produção máxima foi abaixo dos rendimentos da mono-digestão dos substratos.

Bedoić *et al.*, (2019)(BEDOIC *et al.*, 2019) tiveram como objetivo estimar a produção de biogás a partir da co-digestão de capim ribeirinho, silagem de milho e lodo bovino, utilizando como inóculo lodo de digestor anaeróbio. Foram testadas misturas em diferentes proporções e também mono-digestão dos substratos. A co-digestão parou de produzir biogás com 30 dias de operação, enquanto a mono-digestão continuou produzindo até completar 42 dias de operação. À medida que há uma proporção maior da silagem de milho em relação ao capim ribeirinho, ocorre um crescimento do Potencial bioquímico de metano (PBM) e Potencial Bioquímico de Biogás (BGP).

kainthola; Kalamdhad; Goud (2019) investigaram a co-digestão de palha de arroz e *hydrilla vercillata* (cossustrato rico em nitrogênio) visando a produção de biogás. Variou as proporções de carbono/nitrogênio (C/N). Como inóculo foi utilizado lodo de digestor alimentado com esterco bovino. Foram utilizados reatores com volume total de 1000 mL. A proporção C/N encontrada foi de 43 para palha de arroz e 6,85 para *hydrilla vercillata*. Cinco proporções C/N foram testadas no estudo (15, 20, 25, 30, 35 e controle), os substratos foram adicionados de acordo com as proporções selecionadas. Os estudos demonstraram que o aumento da relação C/N, aumenta a produção de biogás, uma vez que melhora a vida microbiana. O C/N 25 foi a melhor relação encontrada, mostrou um aumento de 40% da produção de metano (produção máxima de 2,894 L_{CH₄}/d) e condições operacionais estáveis ao longo do processo (pH, degradação de sólidos voláteis etc.).

Panigrahi; Sharma; Dubey (2020) avaliaram a co-digestão anaeróbia de resíduo de poda e resíduo orgânico (alimentos) em reatores do tipo batelada, com volume total de 1000 mL. O resíduo de poda era composto de 33% de capim 65% de folhas secas e 2% de lascas de madeira. Já o resíduo orgânico foi coletado de uma residência estudantil e era composto principalmente de restos de arroz, vegetais cozidos, pão e carne. Os testes foram realizados com a mistura dos resíduos de duas maneiras: utilizando um pré-tratamento micro-ondas no resíduo de poda e testes sem o processo de pré-tratamento, cada uma das condições testadas foi avaliada para diferentes proporções de comida/microrganismos (C/M: 1; 1,5; 2; 2,5). Os reatores foram operados por cerca de 30 dias e observou-se que os resíduos de poda não tratados codigeridos com resíduo orgânico obtiveram menor produção de metano do que os testes realizados com pré-tratamento, estes obtiveram a produção de 431 ml/gsv, reatores sem pré-tratamento produziram 335 ml/g_{SVadd}.

Paranhos *et al.* (2020) utilizaram seis tipos diferentes de biomassa lignocelulósica (palha de arroz, espiga de milho, casca de amendoim, serragem, casca de café, bagaço de cana-de-açúcar)

para avaliar a produção de metano na co-digestão com estrume de aves. Foram utilizados reatores de 120 mL de volume total, com temperatura controlada de 35 °C com agitação de 180 rpm. Os resultados mostraram os maiores valores de produção de metano para a espiga de milho e estrume de ave (126,02 Nm³CH₄/ton de resíduo).

4. METODOLOGIA

4.1 Procedimento experimental

Os experimentos foram montados no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da UFAL. De caráter exploratório, o delineamento experimental contemplou também um planejamento estatístico. A duração do experimento foi baseada na produção de biogás para cada um dos ensaios realizados.

4.1.1 Caracterização dos substratos e inóculo

As análises físico-químicas dos substratos (capim-elefante e vinhaça) e inóculo (lodo de UASB) foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA), Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC – UFAL). Para a caracterização dos substratos e inóculos, foram determinados: Série de Sólidos, DQO, pH, Alcalinidade, Nitrogênio total e Carboidratos totais.

A Tabela 3 determina a frequência das análises realizadas durante o experimento.

Tabela 3 – Análises realizadas

Análise	Frequência	Método
Sólidos (ST, SVT, STF)	Inicial e Final	(APHA, 1999)
pH	Inicial e Final	(APHA, 1999)
DQO, Nitrogênio e Alcalinidade	Inicial e Final	(APHA, 1999)
Carboidratos totais	Inicial e Final	(DUBOIS, 1956)
Cromatografia (CH ₄ , CO ₂ , H ₂)	5x/semana	(MAINTINGUER <i>et al.</i> , 2008)

Fonte: Autor, 2020.

4.1.2 Substratos e Inóculo

O caldo de capim-elefante (CCE) utilizado como um dos substratos no processo de co-digestão anaeróbia foi obtido a partir colmos do clone Madeira (BAGCE 145), pertencente ao Banco Ativo de Germoplasma de Capim-elefante da Embrapa Gado de Leite, em área experimental instalada no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), situado no município de Rio Largo, Alagoas. O rendimento de CCE foi de 1 litro de caldo para cada 5,44 Kg de colmos prensados na moenda.

A vinhaça de cana-de-açúcar, também utilizada como um dos substratos no processo, neste trabalho, foi coletada na destilaria da Usina Sumaúma, instalada no município de Marechal Deodoro/AL, sendo inicialmente resfriada e, posteriormente, congelada em freezer, onde foi mantida até o momento da realização dos ensaios laboratoriais.

O inóculo utilizado foi obtido de um reator UASB procedente do tratamento de esgoto sanitário de um condomínio residencial localizado em Maceió-AL. Este lodo que serviu de inóculo foi utilizado *in natura*, sem a realização de procedimento de pré-tratamento.

4.1.3 Ensaios em batelada

As condições experimentais foram divididas em dois ensaios distintos, o ensaio I consistiu na utilização das da vinhaça e caldo de capim elefante em diferentes proporções da mistura. Enquanto o ensaio II realizou avaliação nas condições experimentais com melhores desempenho de produção de biogás, com proporções diferentes, além da adição de Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3) em alguns das condições experimentais.

Todos os procedimentos realizados para a partida operação e finalização dos experimentos foram padronizados para a ensaio I e II.

As condições experimentais foram monitoradas diariamente no início da operação através da coleta de biogás dos reatores. A coleta de biogás teve a frequência alterada sempre que fosse verificada a estabilização da produção de biogás. O ensaio I testou os reatores do tipo A, B e C e durou cerca de 30 dias. Enquanto a ensaio II testou os reatores do tipo D, E e F, com duração de cerca de 40 dias.

4.1.3.1 Ensaio I

Para os ensaios na ensaio I, foram utilizados biodigestores experimentais de bancada, modelo batelada, em frascos de vidro com 106 mL de volume total, sendo adotado 60 mL de volume reacional (volume líquido) e 46 mL de *headspace* (volume gasoso).

O estudo totalizou 16 biodigestores distribuídos da seguinte forma:

- Triplicatas da mistura com diferentes proporções (A, B, C, D e E) – 15 unidades;
- Controle – F (apenas com inóculo) – 1 unidade;

O meio reacional foi composto, em volume por, 10% (6 mL) de inóculo (lodo), utilizado para a melhoria da partida dos reatores e estabilização do processo de co-digestão, sendo o restante,

90% do volume reacional, a mistura do caldo de capim-elefante e vinhaça em diferentes volumes (A, B, C, D, E).

As proporções de caldo, tomaram como referência Angelidaki *et al.*, (2009) de acordo com a Tabela 4, abaixo:

Tabela 4 - Proporção de caldo (C) e vinhaça (V) em porcentagem (v/c) para cada teste realizado na Ensaio I.

Proporção (V/C)	Volume útil do reator (mL)	Volume reacional (mL)	Vinhaça (mL)	Caldo de Capim (mL)	Lodo UASB (mL)	Nº de réplicas
25/75 – A	106	60	13,5	40,5	6	3
50/50 – B	106	60	27	27	6	3
75/25 – C	106	60	40,5	13,5	6	3
100/0 – D	106	60	54	0	6	3
0/100 – E	106	60	0	54	6	3
Controle - F	106	60	0	0	6	1

Fonte: O autor, (2020).

Para a realização do experimento, os biodigestores testados foram divididos e operados em dois ensaios. Na primeira fase de teste, foram montadas as condições experimentais do tipo A, B e C, enquanto na segunda fase foram operadas as condições experimentais do tipo D, E e F.

A condição experimental F foi utilizada para fins de avaliação de interferência, conhecida como Controle, operou com 10% do volume de inóculo e 90% do volume reacional sendo água para verificar a produção de gás.

No meio reacional, o ajuste do pH foi realizado para valores em torno de 7,5, através de solução de NaOH 0,1 N.

Para a criação de uma condição anaeróbia nos frascos contendo a mistura (reatores – condições experimentais), foi fluxionado gás argônio durante um minuto. Os frascos foram então vedados e colocados na câmara agitadora, com rotação de cerca de 100 rpm e temperatura controlada de 35°C. O tempo de operação dos reatores variou de acordo com a produção de biogás observada. Todos os testes ocorreram em triplicatas, para garantir a melhor análise entre amostras.

A Figura 4 apresenta a montagem dos frascos (reator em batelada), em triplicata, para uma das condições experimentais testadas, com diferentes proporções %v/v de caldo de capim elefante, vinhaça e inóculo.

Figura 4 - Montagem do reator em batelada testado no primeiro ensaio.



Fonte: O autor, (2020).

4.1.3.2 Ensaio II

Para o ensaio II, foram utilizados biodigestores experimentais que obtiveram os melhores desempenhos na produção de biogás durante o ensaio I e as condições testadas neste ensaio foram escolhidas em virtude dos resultados obtidos no ensaio I.

As condições de 75/25 (A) e 50/50 (B) apresentaram a maior produção de biogás no ensaio I. Logo, para este ensaio foi avaliado o efeito da diluição em água para estas duas condições experimentais (A e B) e o efeito da adição de alcalinizante na condição experimental B.

Portanto foram utilizados reatores modelo batelada, em frascos de vidro com 106 mL de volume total, sendo adotado 40 mL de volume reacional (volume líquido) e 66 mL de *headspace* (volume gasoso).

Neste ensaio foram utilizados 13 biodigestores distribuídos da seguinte forma:

- Duplicatas da mistura com diferentes proporções (1, 2, 3, 4, 5, 6) – 12 unidades;
- Controle - 7 (apenas com inóculo) – 1 unidade;

O meio reacional foi composto, em volume por, 10% (4 mL) de inóculo (lodo). Sendo o restante, 90% do volume reacional, a mistura do caldo de capim-elefante, vinhaça e água em diferentes volumes, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Proporção de caldo (C), vinhaça e água (A) em porcentagem (V/C/A) para cada teste realizado na Ensaio II.

Condição	Proporção (V/C/A) %	Bicarbonato de sódio (gHCO ₃ .gDQO ⁻¹)	Vol. reacional (mL)	Vinhaça (mL)	Caldo de Capim (mL)	Água (mL)	Lodo UASB (mL)	Nº de réplicas
1	50/0/50	0	40	18	0	18	4	2
2	75/0/25	0	40	27	0	5	4	2
3	0/50/50	0	40	0	18	18	4	2
4	50/50/0	0,05	40	18	18	0	4	2
5	50/50/0	0,11	40	18	18	0	4	2
6	50/50/0	0,25	40	18	18	0	4	2
7	Controle	0	40	0	0	36	4	1

Fonte: O autor, (2020).

As condições experimentais 1, 2 e 3 foram idealizadas com o objetivo de avaliar o efeito da diluição das misturas de caldo de capim elefante e vinhaça em água, em proporções variadas. Enquanto as condições 4, 5 e 6 incluíram a adição de bicarbonato de sódio à mistura a fim de avaliar o efeito da produção de biogás diante da adição de alcalinizante.

4.1.4 Acompanhamento e Monitoramento

Após a montagem dos experimentos e partida, foi iniciado o acompanhamento da produção de biogás, que se deu principalmente pela coleta do biogás, para sua caracterização.

Após 24h da montagem e partida dos biodigestores, foi iniciado o monitoramento, por meio da coleta dos gases, efetuada por meio da retirada de 100µL ou 0,1mL de amostra da *headspace* (fase gasosa) nos reatores e injeção manual no cromatógrafo.

A cromatografia foi realizada uma vez ao dia, durante os primeiros 7 dias. Após esse período, foram analisadas a taxa de produção de biogás e a estabilização dos reatores e, à medida que houve uma menor taxa de produção para o período inicial (24h), o intervalo de análise foi espaçado para no máximo 48h.

O método cromatográfico para a determinação da produção de metano e composição do biogás foi efetuado por cromatógrafo a gás, Shimadzu GC-2010- Plus, equipado com detector de condutividade térmica, de acordo com a metodologia desenvolvida por Maintinguer *et al.*

(2008). Foi utilizada a coluna Supelco Carboxen 1010 Plot (30 m de comprimento e diâmetro interno de 0,53 mm). O gás foi retirado dos reatores, utilizando seringa *gastight* com trava (100 μ L ou 0,1mL), durante toda a operação.

As condições cromatográficas foram as seguintes:

- Gás de arraste: Argônio sob fluxo de 21,9 cm.s⁻¹;
- Temperaturas do forno: 30 °C;
- Temperatura da coluna: 200 °C;
- Temperatura do detector: 230 °C;

Após o encerramento do processo de digestão, foi realizada a caracterização final do efluente de acordo com a Tabela 6.

4.1.5 Análises Finais

Este ensaio consistiu na caracterização do efluente final, após o encerramento do experimento e análise estatística dos dados.

Encerrados os experimentos, foi então realizada a caracterização final por meio das análises que consistem na determinação dos resultados da avaliação físico-química (estabelecidos na Tabela 6), sendo possível obter, desta forma os dados de eficiência final.

Para a determinação da produção de metano foi aplicado o mesmo método utilizado por Lapa (2006), Oliveira, (1997), Steil (2007) e Santos Filho (2015). Sendo calculado da seguinte forma:

- As áreas do metano (obtidas através da cromatografia) foram convertidas utilizando a equação padrão da reta em Mol de CH₄;
- Os valores de metano obtidos na amostra (0,1 mL) extraída dos reatores, foram convertidos para o *headspace* de cada frasco através da equação 06 (Equação de conversão do volume da amostra para o headspace);

$$[CH_4]_{\text{no headspace}} \text{ (mol)} = \frac{[CH_4]_{\text{na amostra}} * \text{volume do headspace}}{\text{volume de amostragem (0,1mL)}} \quad (06)$$

Onde:

$[CH_4]_{\text{no headspace}}$ (mol) = Quantitativo de metano no headspace;

$[CH_4]_{\text{na amostra}}$ = Quantidade de metano na amostra injetada no cromatógrafo;

Volume do headspace = Volume total do headspace do reator;

Volume de amostragem = Volume extraído do reator e injetado no cromatógrafo;

- O volume acumulado de metano no *headspace* em mmol de cada reator, foi convertido em mLCH₄ através da equação 07 (Equação geral dos gases).

$$PV = nRT \quad (07)$$

Onde:

$$P = 696,7 \text{ mmHg}$$

V = Volume a ser convertido

n = Número de mol do gás

$$R = 62,3 \text{ mmHg}$$

$$T = 273 + 35^\circ\text{C}$$

Para as triplicatas de reatores utilizados, foram empregados o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) para composição das médias.

Para a apresentação dos dados relativos à produção de metano, foi aplicado às sigmóides de Gompertz através do Origin® 8.0, *software* de gráfico para análise de dados e estatística, desenvolvido pela Originlab.

Foi determinada a máxima taxa de produção de metano.

4.1.5.1 Análise Estatística dos dados

A análise estatística realizada no presente trabalho objetivou modelar a produção de biogás acumulada, utilizando-se de modelo de regressão não linear no processo de co-digestão anaeróbia.

A quantidade de metano acumulada foi então ajustada à sigmoide Gompertz (Tabela 7) com o auxílio do *software* Origin® 8.0. A sigmoide foi derivada numericamente, com a ajuda do mesmo software, a fim de se determinar as velocidades máximas de produção de metano em cada reator (condição experimental).

Tabela 6- Equação do modelo não linear para ajuste à produção acumulada de biogás.

Modelo	Equação
Sigmoide de Gompertz	$Y_i = AS. (\exp(-\exp(-\text{Inc.}(x - \text{PI})))) + u_i$

Fonte: Autor (2020) adaptado de (MUNIZ et al., 2018)

Y_i = volume de biogás acumulado na semana i ;

AS = Assíntota Superior, refere-se ao volume máximo de biogás acumulado pelo sistema;

PI = Ponto de Inflexão, momento no qual ocorre a máxima liberação de biogás;

x = a variável dia;

4.1.5.2 Avaliação metanogênica

A metodologia utilizada para o cálculo da atividade metanogênica está descrito na (VICH, 2006). Sendo utilizada através do *software Origin Pro 8* para calcular o ponto de maior velocidade de produção de metano. Ao dividir o valor da velocidade máxima pela concentração de biomassa nas condições experimentais (g_{sv}), pode-se obter a atividade metanogênica aparente (AMA) e o valor obtido da AMA para a condição experimental controle foi subtraído dos outros reatores, encontrando assim a atividade metanogênica específica (AME).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados os resultados obtidos durante o período médio de 30 dias de operação do experimento. Assim, estão inseridas as análises físico-químicas iniciais e finais das condições experimentais e quantificação do biogás produzido.

5.1 Ensaio I

5.1.1 Caracterização dos substratos

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados das análises realizadas para os substratos (vinhaça, caldo de capim elefante), inóculo e misturas utilizadas no experimento.

Tabela 7 - Características físico químicas dos substratos utilizados no experimento (Ensaio I).

Parâmetros	Unidade	Vinhaça	Caldo de Capim-elefante	Inóculo (Lodo UASB)
DQO	mg/L	31.955,34	8.534,21	-
pH	-	3,76	4,30	6,1
Nitrogênio total	mg/L	994	784	-
Fósforo	mg/L	33,30	265	-
Cobre	mg/L	1,51	1,77	-
Ferro Total	mg/L	25,70	20,50	-
Magnésio	mg/L	210	396,00	-
Manganês	mg/L	4,14	3,05	-
Zinco	mg/L	0,75	9,76	-
Cálcio	mg/L	412	139	-
Potássio	mg/L	3.060	3.900	-
Condutividade	mS/cm	8,37	9,96	-
ST	mg/L	7.600	24.000	35.690
STV	mg/L	7.400	21.400	24.920
STF	mg/L	200	2.600	10.760
Carboidratos	mg/L	15.228,33	70.145,77	-
Alcalinidade	mg/L	-	2.250	-

Fonte: O autor, (2020).

A vinhaça apresentou elevada DQO da ordem de 31.955 mg/L e pH da ordem de 3,76. Entre os macronutrientes analisados, o potássio teve a maior concentração e pode-se observar teores razoáveis de nitrogênio total e cálcio (Tabela 8). Barbosa (2017) apresentou uma caracterização da vinhaça utilizada em seu estudo, com DQO com menor concentração, da ordem de 18.750 mg/L e pH menos ácido (4,72). Albuquerque (2017) encontrou valores de DQO da vinhaça da ordem de 27.600 mg/L.

É possível comparar, ainda pela tabela 8, a concentração de sólidos presentes nos substratos. O caldo de capim elefante apresentou uma concentração cerca de 3 vezes mais elevada de Sólido Totais (24.000 mg/L) do que a amostra de vinhaça coletada (7.600 mg/L).

Já o caldo de capim-elefante (CCE) apresentou pH da ordem de 4,30 e entre os macronutrientes analisados, o potássio também teve a maior concentração e pode-se observar ainda um valor elevado para fósforo total (265 mg/L).

O CCE analisado, apresentou uma DQO inicial de 8.534,1 mg/L. No trabalho de Carvalho *et al.*, (2016), foi analisado o capim elefante hidrolisado (CEH), após pré-tratamento realizado e a DQO inicial do CEH foi da ordem de 19.200 mg/L com um pH de 10,4. Valores muito acima do encontrado para o caldo de capim elefante *in natura*. Também utilizando capim elefante hidrolisado, Huang *et al.*, (2019) encontraram valores de DQO da ordem de 19.000 mg/L para o CEH. Logo, o pré-tratamento utilizado nesses experimentos gerou um substrato mais concentrado de capim elefante.

A Tabela 8 apresenta os resultados das análises realizadas nas misturas utilizadas durante a operação. Os valores observados na tabela, são referentes ao pH da mistura antes do ajuste realizado.

Tabela 8 - Resultados físico-químicos iniciais das frações utilizadas no experimento.

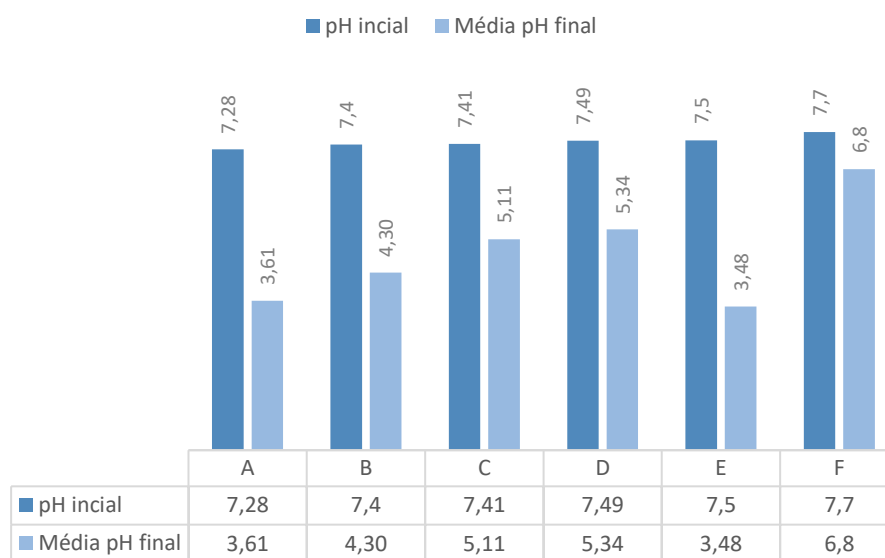
Parâmetro	A (25/75)	B (50/50)	C (75/25)	D (100/0)	E (0/100)
pH	4,8	4,35	4,07	3,75	6,22
DQO (mg/L)	14.375,63	20.316,98	26.258,33	30.601,91	8.024,784
ST (mg/L)	19.900	15.800	11.700	9.004	24.046
STV (mg/L)	17.900	14.400	10.900	8.276	4.666,7
STF (mg/L)	4.550	3.100	1.650	728	5.700

Fonte: O autor, (2020).

5.1.2 Avaliação do pH

Os valores de pH iniciais foram medidos para todas as misturas testadas, após a adição da solução de NaOH (0,1N), que foi realizado para o ajuste do pH no intervalo ótimo de operação. A Figura 5 dispõe sobre os valores iniciais e finais de pH observados em cada uma das condições experimentais.

Figura 5 - Variação do pH inicial e final para cada condição no ensaio I. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor, (2020).

O pH ideal para a digestão anaeróbia situa-se no intervalo entre 7 e 8,5, observa-se que ao longo do processo houve um importante decaimento dos valores de pH em todas as condições experimentais, exceto F (controle), que foi o único que se manteve estável. Os menores resultados podem ser identificados nas condições A e E, onde o pH decresceu até cerca de 3,6 e 3,5 respectivamente.

Uma vez que o processo de DA é realizado em dois estágios, separados pelo processo de hidrólise/acidogênese e acetogênese/metanogênese, onde o pH ótimo da acidogênese é situado entre 5,5 e 6,5, a queda do pH pode representar a predisposição ao acúmulo de ácidos voláteis (acidificação) dos reatores, fazendo com que a taxa de crescimento metanogênico seja reduzida devido a essa acidificação (HOLLIGER *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2019).

Pode-se observar também que as condições experimentais com as maiores concentrações de vinhaça (C e D), foram as que apresentaram os maiores valores de pH ao final da operação. O pH inicial do caldo de capim-elefante (Tabela 9) foi de 6,22, perto da neutralidade. No entanto, todas as condições operadas com elevada concentração de capim apresentaram um decaimento maior. Esse fato pode representar o comportamento expressivo do caldo do capim elefante na acidificação dos reatores.

A acidificação dos reatores utilizando capim-elefante também foi observada por Haryanto *et al.*, (2018), que testou a co-digestão do capim e esterco bovino em diferentes diluições, sem

adicionar nenhum tipo de alcalinizante e percebeu a acidificação dos reatores ao final do período de batelada testado, chegando a valores mínimos de 4,5.

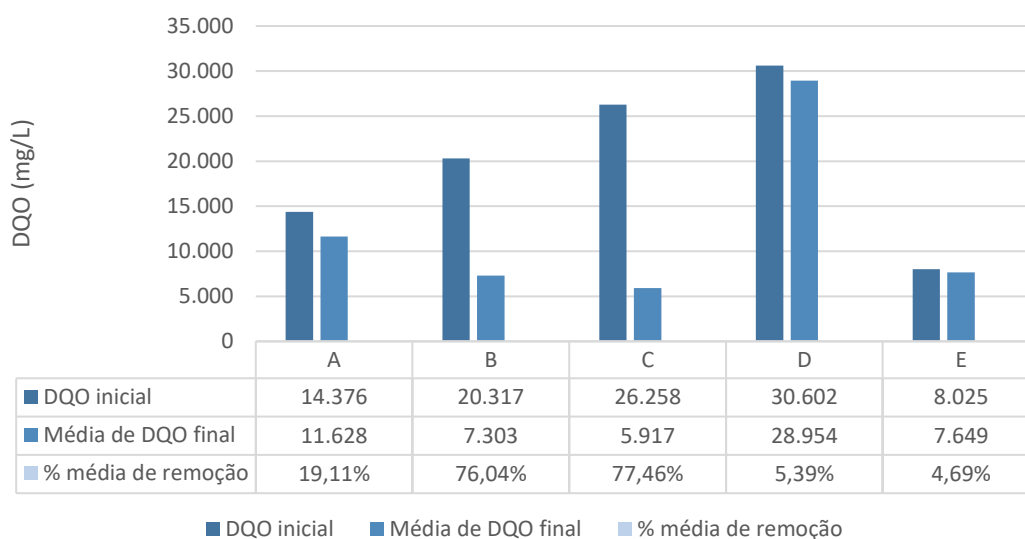
5.1.3 Desempenho das condições experimentais

A remoção de DQO no sistema foi utilizada neste trabalho como um indicativo da eficiência do processo de co-digestão anaeróbia.

As eficiências de remoção de DQO são parâmetros confiáveis para o processo de digestão anaeróbia, visto que o acúmulo de DQO no processo pode demonstrar um desequilíbrio metabólico no sistema, além da inibição da produção de biogás (KAINTHOLA; KALAMDHAD; GOUD, 2019).

A Figura 6 demonstra a eficiência de remoção de DQO para cada tipo de condição experimental, para o Ensaio I.

Figura 6 - Eficiência de remoção de DQO (Ensaio I). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor (2020).

Analisando a Figura 6, observa-se que as condições experimentais que obtiveram maior eficiência de consumo de DQO foram B (%v/c 50/50) e C (%v/c 75/25), com eficiência de consumo de DQO de 76,04% e 77,46%. Já as condições que apresentaram menor eficiência de consumo foram os do tipo D (%v/c 100/0) e E, (%v/c 0/100), apresentando uma eficiência de consumo de DQO de 5,39% e 4,69%. Neste sentido, pode-se avaliar que houve um incremento da eficiência na co-digestão.

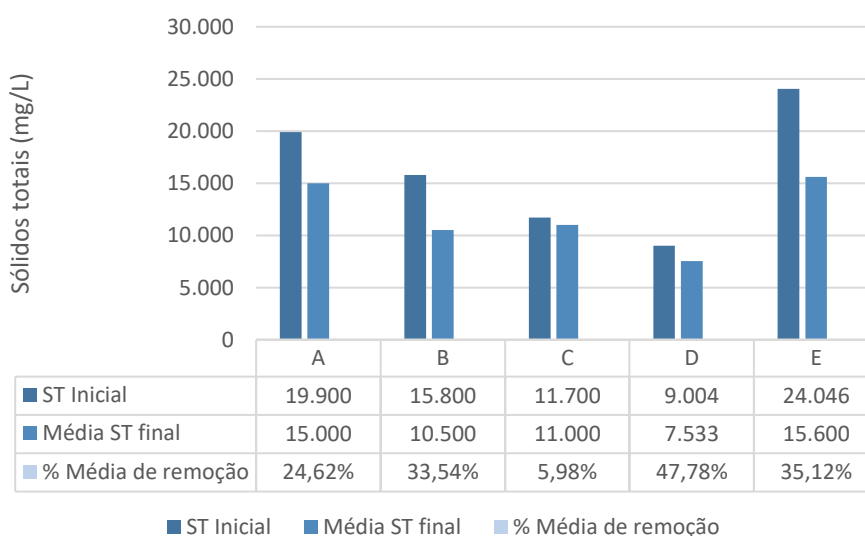
No entanto, é possível verificar que, dentre as condições experimentais testadas na co-digestão, a condição A, com a maior concentração de caldo de capim elefante, apresentou o menor consumo de DQO.

Huang *et al.*, (2019) encontraram uma eficiência de remoção de DQO maior que 90% durante o processo de digestão anaeróbia do capim elefante hidrolisado (CEH), indicando que o CEH é um substrato adequado na DA, com baixa inibição de degradação de matéria orgânica. No entanto, o presente trabalho observou a baixa eficiência de consumo de DQO para as condições experimentais utilizando apenas caldo de capim (E) com apenas 4,69% de remoção, o que demonstrou que a utilização do caldo de capim elefante sem tratamento não apresentou o mesmo êxito, porém a co-digestão do substrato melhorou a eficiência de consumo de DQO.

5.1.4 Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

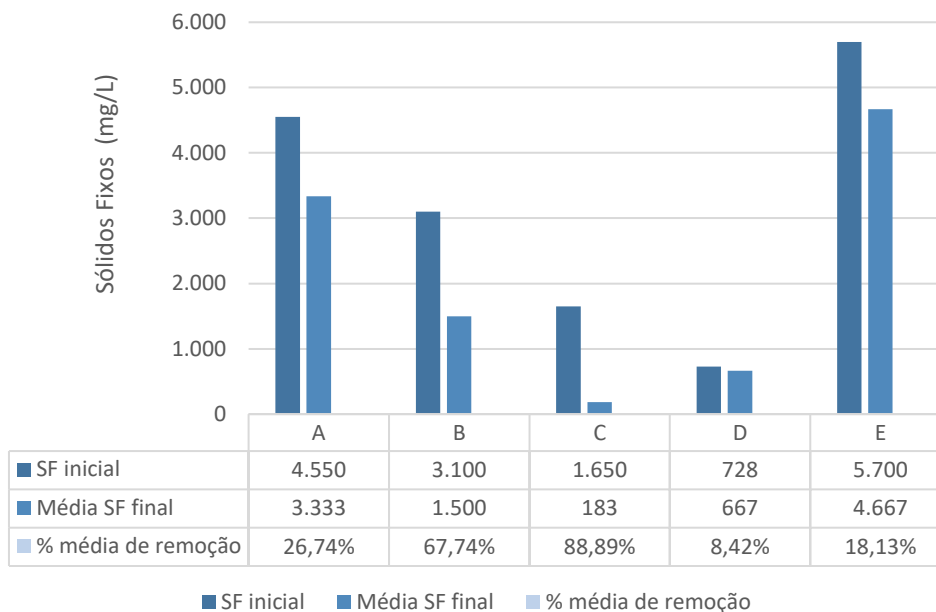
As Figuras 7, 8 e 9, apresentam os valores para análise de sólidos totais, sólidos voláteis totais e sólidos fixos totais (SF) encontrados no início e após a desativação dos reatores.

Figura 7 - Variação de Sólidos Totais inicial e final. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



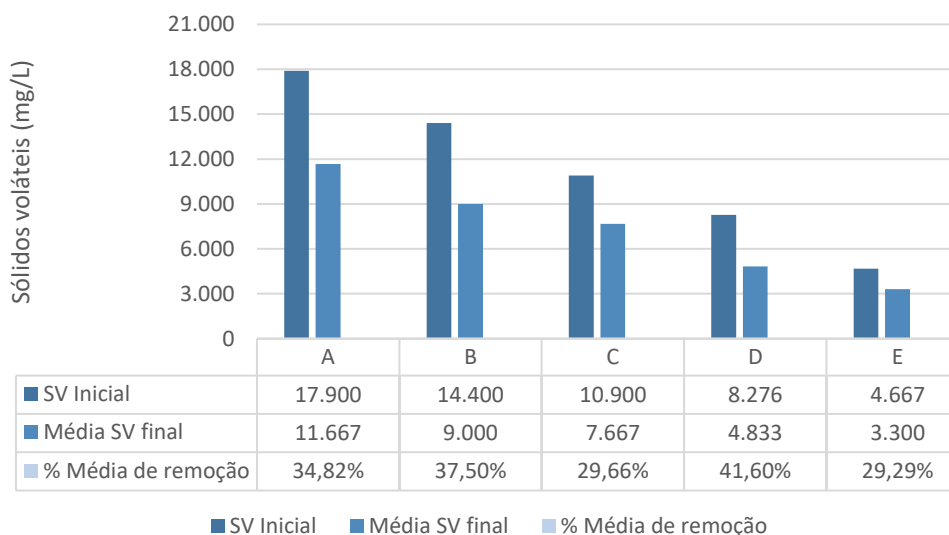
Fonte: O autor, (2020).

Figura 8 - Variação da concentração de Sólidos Fixos. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor, (2020).

Figura 9 - Variação de Sólidos Voláteis inicial e final. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor, (2020).

Supostamente, uma vez que a quantidade de SV dos substratos inseridos nos reatores pode representar a matéria orgânica disponível a ser digerida, espera-se que um processo de DA ocorra de maneira eficiente quando o consumo de sólidos voláteis totais seja elevado. As eficiências de remoção de sólidos voláteis obtiveram um desvio padrão médio de 5%, não

apresentando assim indicativo de variação relevante. Os maiores consumos de SV foram encontrados para as condições C e B (44,95% e 37,05 %) respectivamente.

5.1.5 Geração de biogás

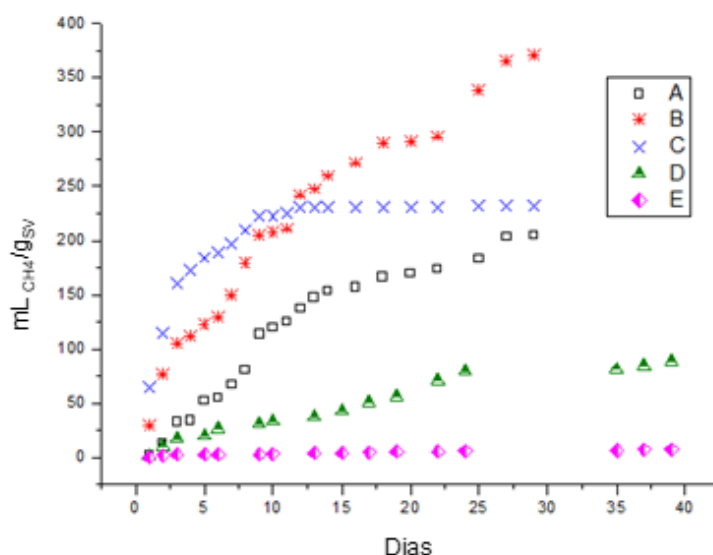
A partir da análise da área cromatográfica, foi possível encontrar o volume de biogás produzido em cada condição experimental e o acumulado durante a operação do experimento. Assim, foram gerados resultados produzidos em função dos sólidos voláteis adicionados a cada uma das condições testadas.

5.1.5.1 Análise comparativa da produção de biogás acumulada

A condição F, conhecida também como controle, foi composta exclusivamente do inóculo (Lodo de UASB) diluído com água, sem a adição de nenhum substrato testado no experimento. Dessa maneira, a produção de metano acumulada registrada equivale à capacidade de produção exclusivamente do inóculo, podendo demonstrar alguma interferência do inóculo na produção de biogás. F apresentou máxima produção de metano acumulada de 1,1 mL_{CH₄}/g_{SV}.

A Figura 10, utilizou a média das réplicas realizadas para cada tipo de condição experimental estudada, em um único gráfico para o melhor comparativo da produção acumulada na operação.

Figura 10 - Comparativo da produção de metano acumulada nas condições experimentais (Ensaio I). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



A partir dos dados apresentados na Figura 10 da produção acumulada de metano para as condições experimentais, é possível observar a ordem de grandeza da geração de metano para cada uma das condições experimentais e realizar um comparativo entre os valores obtidos.

As condições experimentais que apresentaram as menores produções de metano acumuladas no período estudado foram os do tipo D e E, que são representados pela mono-digestão, com 100% vinhaça e 100% caldo de capim elefante, respectivamente. Tendo a vinhaça superado a produção do caldo do capim elefante final em 91%. O teste realizado apenas com vinhaça (D) apresentou ao final do experimento a produção de metano da ordem de 89,1 mL_{CH4}/g_{SV} e para as condições experimentais testadas apenas o caldo de capim elefante (E) obteve produção final de 7,6 mL_{CH4}/g_{SV}.

O comparativo da produção de metano mostrou que houve um decaimento das condições experimentais do tipo D e E, 100/0 e 0/100 respectivamente, em relação às misturas, o que pode evidenciar o melhor desempenho da co-digestão em relação a mono-digestão.

Das condições experimentais operadas com as diferentes proporções da mistura de vinhaça e caldo de capim elefante, a condição experimental B, com 50% de cada substrato, apresentou a maior produção de metano acumulada no período, chegando a 370,942 mL_{CH4}/g_{SV}. Seguido da condição experimental do tipo C (75/25) que atingiu 231,6 mL_{CH4}/g_{SV}. E por último a condição experimental com a maior proporção de caldo de capim elefante (A), 75% de caldo de capim elefante e 25% de vinhaça, atingindo a produção máxima acumulada de 204,9 mL_{CH4}/g_{SV}.

Os resultados obtidos podem evidenciar que a mistura de vinhaça e caldo de capim elefante tem potencial de produção de biogás. No entanto a elevada concentração de caldo de capim elefante afetou negativamente na produção de biogás.

HARYANTO *et al.* (2018) verificaram a co-digestão de capim elefante e esterco bovino com diluições diferentes e observaram que quanto maior a diluição da mistura maior foi a produção de metano, chegando à produção máxima de 111,7 mL_{CH4}/g_{SV}. Concluindo que a adição de capim elefante ao esterco bovino aumentou potencialmente a produção de metano e sugeriu um pré-tratamento mecânico a ser realizado no capim-elefante.

Comparando a produção de metano acumulada na co-digestão com outras matérias de origem vegetal, Kainthola; Kalamdhad; Goud, (2019) avaliaram a co-digestão de palha de arroz e *Hydrilla verticillata* (co-substrato rico em nitrogênio) para diferentes relações C/N e encontraram uma produção máxima da ordem de 2.984 mL/g_{VS} para C/N 25.

A correlação entre a remoção de DQO das condições experimentais e a produção de metano acumulado fica evidente, uma vez que as condições com o menor valor de produção de metano acumulado, D e E, também apresentaram valores reduzidos no consumo de DQO testado,

5,39% e 4,69%, respectivamente. Ainda a partir do mesmo comparativo, as condições experimentais com os melhores desempenhos na produção acumulada de biogás, apresentaram as maiores eficiências de remoção de DQO, da ordem de 76,04% para B e 77,46% para C.

Diferentemente da remoção de DQO, os valores finais de pH encontrados não podem ser diretamente relacionados ao desempenho na produção de biogás. Observou-se que a redução de pH foi determinada pela concentração de caldo de capim elefante da mistura. Quanto maior o volume de caldo de capim utilizado na mistura, menor o pH final encontrado.

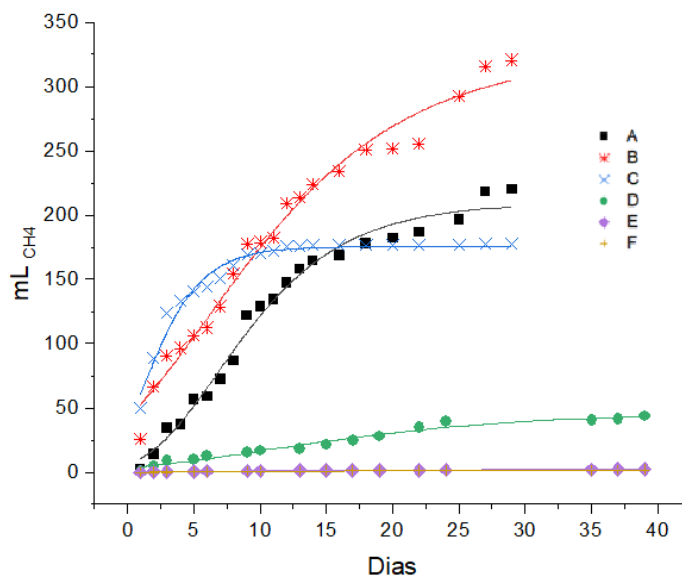
Ao realizar a comparação da produção de metano com a remoção de sólidos voláteis obtidos, pode-se observar que as condições experimentais com as maiores produções acumuladas de biogás (B e C) também apresentaram a maior remoção de sólidos voláteis do grupo estudado. No entanto C obteve eficiência de remoção maior, da ordem de 44,95% e o do tipo B apresentou consumo de 37,5% de sólidos voláteis totais.

5.1.5.3 Avaliação da atividade metanogênica

Esta avaliação teve como objetivo estimar o potencial da biomassa aplicada em cada uma das condições experimentais testadas. As funções em formato de “S”, conhecidas como funções sigmóides, podem ser utilizadas para descrever a produção acumulada de biogás num determinado sistema. Usualmente o comportamento das curvas de produção acumulada de metano deve apresentar um comportamento crescente (sem máximos e mínimos), mas com ponto de inflexão definido, que é apresentado como a taxa máxima de variação da função ou máxima taxa de produção acumulada (FLORENTINO; BISCARO; PASSOS, 2010).

A Figura 11 apresenta a produção de metano acumulado nas condições experimentais (meio reacional) correlacionado ao tempo de produção. Os dados obtidos foram ajustados à função sigmoide *Gompertz* para todas as concentrações estudadas.

Figura 11 - Produção de metano acumulado no *headspace* ajustado à curva *Gompertz*. Ajuste da sigmoide para as condições experimentais. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor, (2020).

É possível notar pelas curvas de vinhaça e caldo de capim elefante, D e E respectivamente, a menor produção acumulada (da ordem de 50 mL), enquanto as diferentes proporções testadas chegaram a valores da ordem de 350 mL CH_4 .

A partir da derivada de cada curva sigmoide ajustada as condições experimentais, foi possível determinar a AME. A velocidade de produção de metano (Tabela 10) foi obtida pela razão da máxima taxa de produção $\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{d}$ e a concentração de biomassa adicionada nas condições experimentais (g_{SV}).

Tabela 9 - Atividade metanogênica específica para cada condição experimental. A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).

	Período de produção máxima (dias)	Velocidade máxima ($\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{d}$)	Média SVT inicial e final (g/L)	AMA ($\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}.\text{d}$)	AME ($\text{mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}.\text{d}$)
A	7	14,57	14,78	0,99	0,98
B	5	14,12	10,20	1,39	1,38
C	1	26,25	9,28	2,83	2,83
D	11	1,55	6,55	0,24	0,23
E	7,0	0,065	3,98	0,02	0,013
F	10	0,067	18,69	0,004	-

Fonte: O Autor, 2020.

Nas Figuras 12 e 13, são demonstradas a produção máxima de metano em mL, máxima taxa de produção (velocidade) em mL/d e o tempo máximo de produção.

Figura 12 - Produção máxima de CH₄ (mL) e tempo máximo para a produção de CH₄ (dias) em função das condições experimentais. Produção máxima de produção (mL) (*), tempo máximo de produção (▲). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).

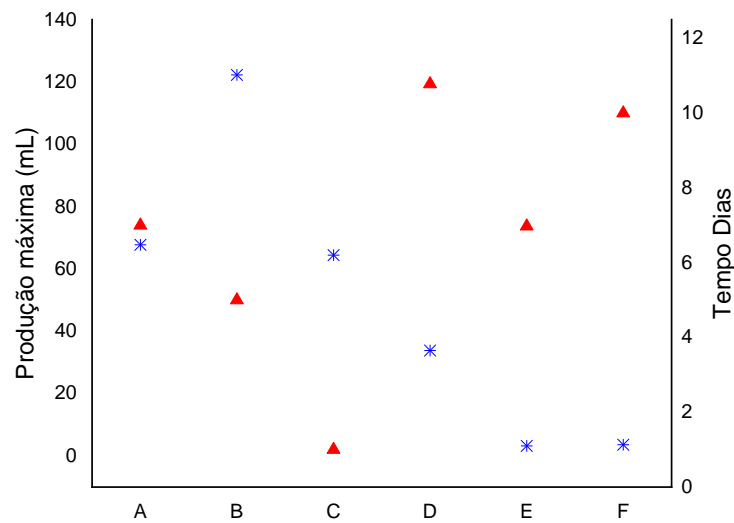
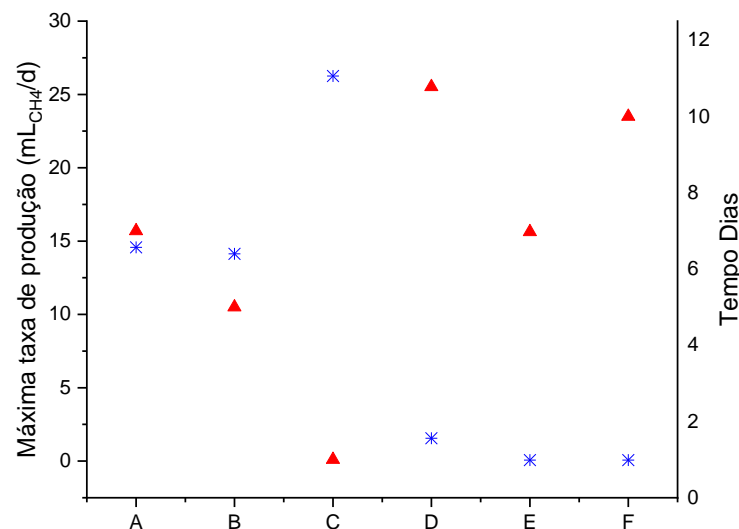


Figura 13 - Máxima taxa de produção CH₄ (mL_{CH4}/d) e tempo máximo para produção de metano (dias) em função de cada condição experimental. Máxima taxa de produção (*), tempo máximo de produção (▲). % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



A condição C, alimentada com 75% de vinhaça e 25% de caldo de capim-elefante apresentou produção máxima de metano acumulada de 64,41 mL_{CH4} (Figura 12) e ainda a máxima taxa de produção (26,25 mL_{CH4}/d), como apresentado na Figura 13. No entanto, a partir dos resultados obtidos com a derivada, foi possível observar que o período de produção máxima de metano foi de um dia, a partir deste período houve um decaimento da produção. Desta maneira pode-se justificar a menor produção acumulada de metano para C, já que de maneira antagônica a produção de C apresentou a segunda maior de produção de metano acumulada.

A condição experimental com a maior atividade metanogênica específica calculada pode garantir o maior sucesso na geração de metano durante a fase de digestão anaeróbia. (SIMÕES, 2017).

A condição A foi o segundo digestor em termos de velocidade de produção de metano. No entanto, apresentou a pior produção de metano acumulada entre os digestores testados na co-digestão (A, B, C).

A condição B, alimentado com 50% de vinhaça e 50% de caldo de capim-elefante, apresentou um intervalo de produção máxima de metano de cinco dias, obteve a segunda maior velocidade de produção, da ordem de 14,13 mL_{CH₄}/d.

5.2 Ensaio II

5.2.1 Caracterização dos substratos

A caracterização completa dos substratos foi realizada no ensaio I. No entanto, como o experimento do ensaio II foi realizado com amostras dos substratos de lotes diferentes, houve uma caracterização inicial englobando os parâmetros apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Características físico químicas dos substratos utilizados no experimento (Ensaio II). %V/C/A (alcalinizante): 50/0/50, 75/0/25, 0/50/50, 50/50/0 (0,05), 50/50/0 (0,11), 50/50/0 (0,25).

Parâmetros	Unidade	Vinhaça	Caldo de Capim-elefante
DQO	mg/L	68.053,1	81.175,41
ST	mg/L	16.744	86.168
STV	mg/L	12.316	53.668
STF	mg/L	4.428	14.500

A partir dos dados apresentados na Tabela 10 é possível verificar valores mais elevados de DQO e sólidos no lote do ensaio II.

O caldo de capim elefante apresentou uma concentração cerca de quatro vezes mais elevada de Sólido Totais (68.168 mg/L) do que a amostra de vinhaça coletada (16.744 mg/L), de maneira similar aos resultados da Ensaio I que apresentaram uma proporção três vezes maior de Sólidos Totais do CCE em relação à vinhaça.

A vinhaça apresentou elevado conteúdo orgânico da ordem de 68.053 mg/L, quase duas vezes mais do que o encontrado na vinhaça da Ensaio I. Os valores de concentração de DQO para

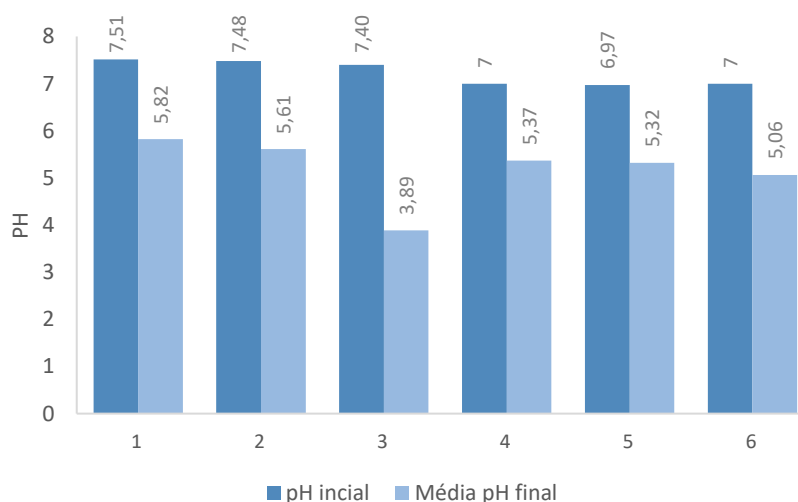
vinhaça gerada a partir da cana-de-açúcar, mesmo com a mesma origem, diferem consideravelmente entre trabalhos científicos (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

5.2.2 Análise geral e comparativa das condições experimentais dos ensaios I e II

Neste tópico é apresentada uma análise ampla dos dados obtidos na Ensaio II, sendo estes confrontados com os dados obtidos na Ensaio I, a fim de avaliar produção de metano diante das variações características realizadas entre um ensaio e outro.

A Figura 14 apresenta os valores iniciais medidos e os finais observados após o encerramento do experimento da Ensaio II. Foram medidos os valores iniciais e finais de cada uma das condições experimentais após a adição da solução de NaOH (0,1N) e Bicarbonato de Sódio (HCO_3).

Figura 14 - Variação do pH inicial e final para cada condição experimental no ensaio II. %V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).



Fonte: O autor, (2020).

A partir da Figura 14, é possível destacar que a condição 3, operada com 50% de água e 50% de caldo de capim elefante, apresentou o menor valor de pH ao final do experimento na Ensaio II.

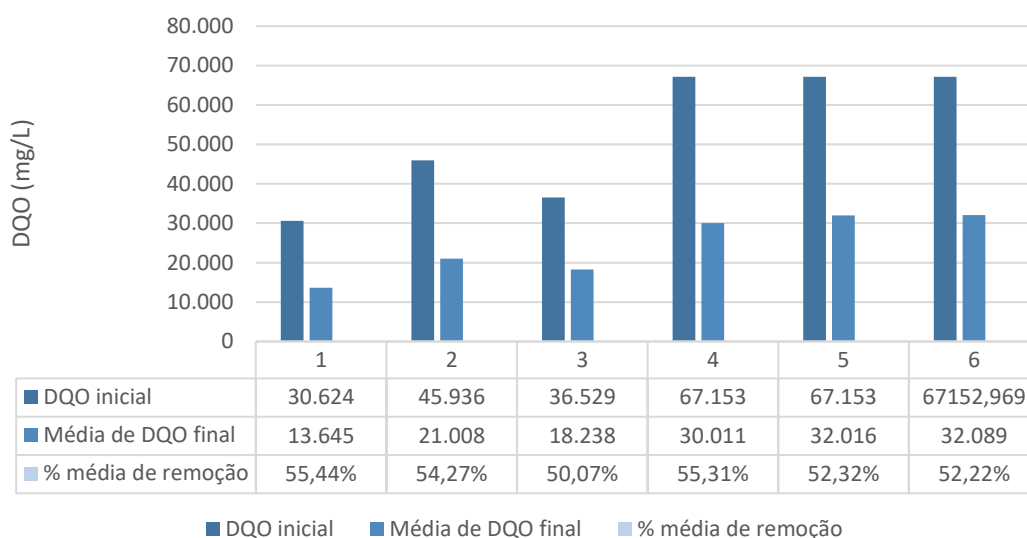
Este comportamento se mostrou semelhante ao da Ensaio I, em que as condições experimentais com maiores volumes de CCE, as condições E e A respectivamente, apresentaram o maior decaimento do pH, chegando a valores da ordem de 3,5.

Já as condições 4, 5 e 6, onde foram adicionadas diferentes concentrações de Bicarbonato de Sódio (HCO_3), conseguiram manter a estabilidade, com valor médio de 5,3 ao fim do

experimento, enquanto no ensaio II a mesma condição operada sem a adição de alcalinizante apresentou valor médio de 4,3 no encerramento dos testes.

A Figura 15 apresenta a eficiência de remoção de DQO para as condições experimentais no Ensaio II.

Figura 15 - Eficiência de remoção de DQO para as condições experimentais (Ensaio II). %V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).

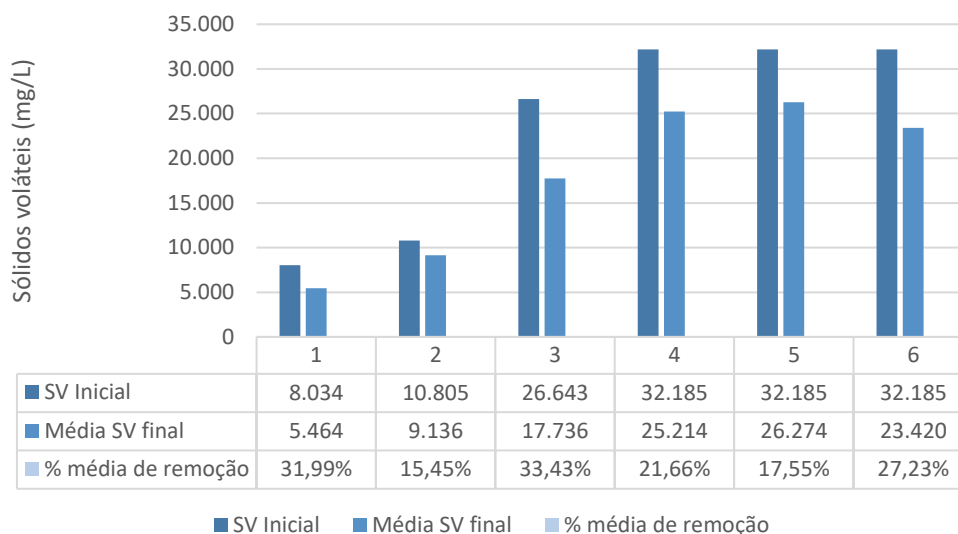


Fonte: O autor, (2020).

Na Ensaio I do experimento foi possível correlacionar a eficiência de DQO à produção de metano. No entanto, pode-se verificar na Figura 15 que na Ensaio II a remoção de DQO se manteve constante para todos as condições experimentais testadas, chegando ao máximo de 55,44% de remoção de DQO.

A Figura 16 apresenta a eficiência de remoção de sólidos voláteis totais para as condições experimentais avaliadas no ensaio II.

Figura 16 - Variação de Sólidos Voláteis inicial e final para as condições experimentais (Ensaio II). % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).



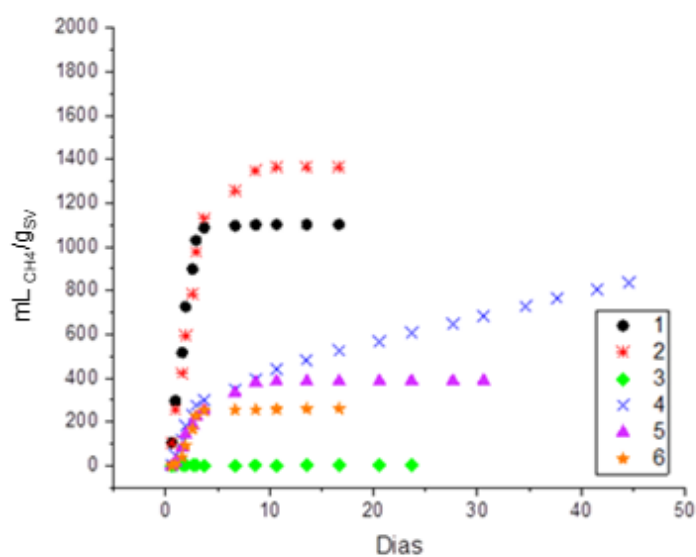
Fonte: O autor, (2020).

Diferente do encontrado no ensaio I, não houve uma remoção elevada dos sólidos voláteis nas condições experimentais do ensaio II. A eficiência máxima de remoção chegou a valores na ordem de 33,43% na condição 3.

A Figura 17 apresenta o comparativo entre as produções de metano obtidas no ensaio II do experimento. A condição experimental que apresentou as menores produções de metano acumulada no período estudado foi a condição 3, que apresenta a diluição de 50% de caldo de capim elefante em 50% de água. Fato semelhante é encontrado no ensaio I, onde a condição operada apenas com caldo de capim elefante (E) foi a que apresentou a menor produção acumulada de metano, chegando a valores médios finais de 4,045 mLCH₄/g_{SV}.

A condição experimental 3 operada apenas com caldo de capim elefante e água (Ensaio II) apresentou uma produção 2,81 mLCH₄/g_{SV}, demonstrando que a diluição do caldo de capim elefante diminuiu a produção de metano em cerca de 30%, apresentando valores muito menores de produção acumulada em relação a outras condições testadas.

Figura 17 - Comparativo da produção de metano acumulada nas condições experimentais no ensaio II. % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).



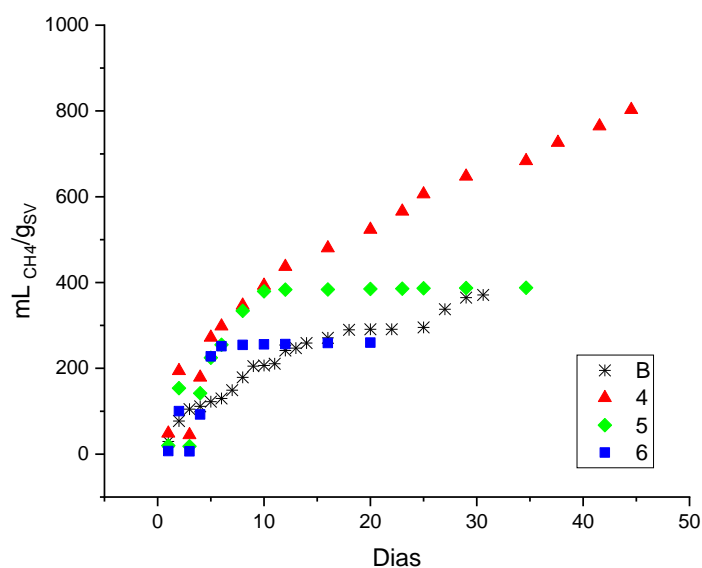
Fonte: O autor, (2020).

As condições experimentais 1 e 2, operadas com 50% e 75% de vinhaça respectivamente, diluídos em água, apresentaram uma produção acumulada de metano crescente durante cerca de 10 dias de experimento, finalizando o experimento com a condição 2 apresentando a maior produção acumulada de metano (1364,1 mL CH₄/g_{SV}). De forma antagônica, a produção acumulada no ensaio I, utilizando a vinhaça com 100% do volume reacional (D), obteve valor de 88,33 mL CH₄/g_{SV}.

Pode-se perceber através da Figura 17 que para ambas as diluições realizadas na vinhaça (condições 1 e 2 – ensaio II), ouve uma produção expressiva de metano em relação a outras condições.

Na Figura 18, é apresentado o comparativo da produção acumulada de metano nas condições experimentais operadas com 50% de caldo de capim elefante e 50% de vinhaça, sendo a condição B (Ensaio I) operada sem adição de alcalinizante, enquanto as condições 4, 5 e 6 (Ensaio II) foram operadas com concentrações crescentes de bicarbonato de sódio adicionado à mistura.

Figura 18 - Comparativo da produção acumulada nas condições experimentais com 50% de vinhaça e 50% de caldo de capim elefante, dos ensaios I e II, com e sem adição de bicarbonato de sódio. %V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25) e %V/C: B (50/50)



Fonte: O autor, (2020).

Diante do exposto no gráfico da Figura 18, é possível destacar o incremento da produção de metano nas condições experimentais operadas com a adição de bicarbonato de sódio, onde é possível identificar a importância da estabilização do pH no processo de DA.

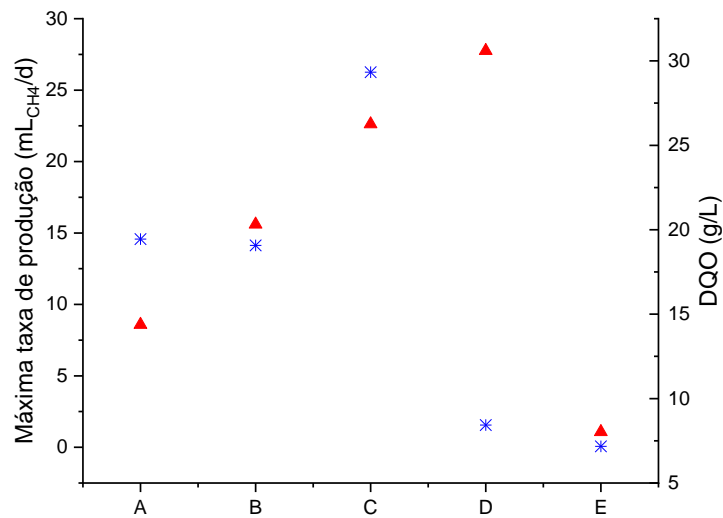
De forma contraditória, a condição B (ensaio I) a partir do dia 16 ultrapassou a produção acumulada na condição 6 (Ensaio II), que foi encerrada com uma produção acumulada final de 259,86 mL CH₄/g_{SV}. A condição B atingiu a produção acumulada de 370,94 mL CH₄/g_{SV} ao final do 29º dia.

Ainda a partir da Figura 18, observa-se que a maior produção acumulada de metano é encontrada na condição 4 (836,18 mL CH₄/g_{SV}), operada com a menor concentração de alcalinizante (0,05 gHCO₃.gDQO⁻¹) entre as condições experimentais testadas, sendo a produção reduzida de acordo com o aumento da adição de alcalinizante.

As Figuras 19 e 20 apresentam a relação das máximas taxas de produção de metano e a carga orgânica adicionada (DQO em g/L) em cada condição estudada.

As condições experimentais operadas no ensaio I tiveram uma aplicação de carga orgânica menor, da ordem de 8,024 a 26,25 g/L de DQO e máximas taxas que variaram de 0,065 a 14,57 mL_{CH₄}/d (Figura 19).

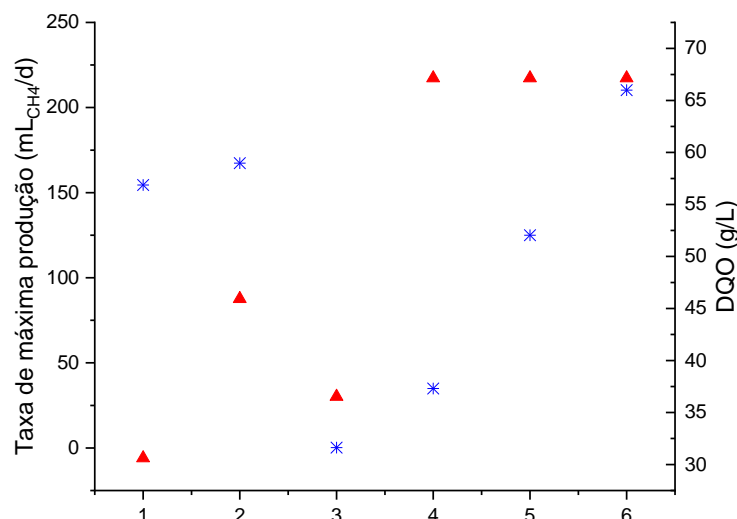
Figura 19 - Máxima taxa de produção CH₄ (mLCH₄/d) e DQO aplicada. Máxima taxa de produção (*) e DQO em g/L (▲) do ensaio I. % V/C: A (25/75), B (50/50), C (75/25), D (0/100), E (100/0).



Fonte: O autor, (2020).

Na Figura 20, a seguir, pode-se verificar que as máximas taxas de produção de metano estiveram entre 0,22 a 210 mLCH₄/d, com elevado teor de carga orgânica aplicada (30,62 a 67,15 g/L de DQO).

Figura 20 - Máxima taxa de produção CH₄ (mLCH₄/d) e DQO aplicada. Máxima taxa de produção (*) DQO em g/L (▲) do Ensaio II. % V/C/A (alcalinizante): 1 (50/0/50), 2 (75/0/25), 3 (0/50/50), 4 (50/50/0 - 0,05), 5 (50/50/0 - 0,11), 6 (50/50/0 - 0,25).



Fonte: O autor, (2020).

Na Figura 20, as condições experimentais 4, 5 e 6 com mesma concentração inicial de DQO e diferentes concentrações de alcalinizante, apresentaram um comportamento de incremento dos

valores obtidos da máxima taxa de produção de metano de acordo com o acréscimo de bicarbonato de sódio.

6. CONCLUSÃO

A co-digestão anaeróbia, utilizando como substratos a vinhaça e caldo de capim elefante, operada sob condição mesofílica, sem realização de pré-tratamento, mostrou-se eficiente no processo de digestão anaeróbia. O melhor desempenho de consumo de DQO foi encontrado nas condições experimentais C (com 25% de CCE) e B (com 50% de CCE), que apresentaram a eficiência de remoção de 77,46% e 76,04% respectivamente. A eficiência de remoção de DQO, no entanto, demonstrou decair quando houve o aumento da concentração de caldo de capim elefante para 75%, representando desta vez um consumo de apenas 19%.

Foi possível ainda, verificar um aumento de até 93% no consumo de DQO, quando o processo de digestão anaeróbia foi realizado com mais de 01 (um) substrato. A digestão da vinhaça reduziu 5,39% da DQO e o caldo de capim elefante 4,69%.

Da avaliação das condições operacionais em relação ao parâmetro pH, foi possível verificar o decaimento de até 50% do pH em relação ao pH inicial da operação na condição operacional do tipo E (%v/c 0/100), chegando a valores finais de 3,5. As condições experimentais que obtiveram o menor decaimento do pH são as que possuem as maiores concentrações de vinhaça, condição D (%v/c 100/0) e C (%75/25), seguida de B (%50/50). Portanto pode-se correlacionar o acúmulo de ácidos com a presença de maior concentração de caldo de capim elefante e, ainda, com instabilidade das condições experimentais, uma vez que os valores menos elevados de pH foram obtidos nas condições experimentais com pior desempenho de consumo de DQO.

A produção de biogás mostrou melhor eficácia com a proporção de 50% de vinhaça e 50% de caldo de capim elefante, apresentando rendimento acumulado máximo de 370,94 mL CH_4/gSV , seguido de C que apresentou rendimento acumulado máximo de 231,64 mL CH_4/gSV . A mono digestão dos substratos não se mostrou ideal.

A condição testada no ensaio II com a diluição dos substratos em água apresentou um efeito similar da produção de biogás, ao comparar com o ensaio I as condições testadas apenas com caldo de capim elefante. Ambos apresentaram valores baixos de produção de metano ao se comparar com os testes utilizando a vinhaça.

Enquanto os valores de produção de metano para a diluição da vinhaça em água do ensaio II apresentaram um expressivo aumento da produção de biogás em relação à condição testada com proporções de caldo de capim e vinhaça. Logo, para as condições estudadas, o caldo de capim elefante não apresentou benefício para a produção de biogás.

A análise realizada com adição de bicarbonato de sódio à mistura de 50/50% caldo de capim elefante e vinhaça apresentou um decaimento menor de pH se comparado ao ensaio I. Além disso, pode-se verificar que maiores concentrações de alcalinizantes não conferem ao sistema maior produção de biogás. Sendo a concentração de $0,05 \text{ gHCO}_3 \cdot \text{gDQO}^{-1}$, a menor testada, aquela que apresentou a maior produção de metano ($836,18 \text{ mL}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}$) entre as misturas que receberam a adição bicarbonato de sódio.

Este experimento permite afirmar que o emprego do capim-elefante na co-digestão com vinhaça se mostra uma alternativa eficaz de acordo com a concentração CCE adicionada e evidencia a necessidade de utilização de alcalinizante em pequenas concentrações, uma vez que valores elevados de caldo de capim-elefante na mistura não apresentaram resultados satisfatórios.

Dado que o capim-elefante em forma de caldo ainda é pouco estudado, se faz necessária a utilização com substratos diferentes visando avaliar o efeito da adição do caldo como comparativo.

Além disso apenas a utilização de alcalinizante não se mostrou suficiente para inibir a acidificação das condições testadas, logo sugere-se o emprego de tratamentos químicos no substrato a fim de estabilizar os valores de pH durante a operação do experimento.

REFERÊNCIAS

- ABBADO, Marcela Ribeiro. **Estabelecimento de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Shum.) em áreas de *Brachiaria decumbens* Stapf. explorando o potencial alelopático de leguminonas tropicais.** 1995. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, [S. l.], 1995.
- ALBUQUERQUE, JN. **Produção de metano em AnSBBR tratando vinhaça em condição termofílica.** 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-03082017-100654/en.php>.
- ANDERSON, W.; CASLER, M.; BALDWIN, B. Improvement of Perennial Forage Species as Feedstock for Bioenergy. **Genetic Improvement of Bioenergy Crops**, [S. l.], p. 308–345, 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-70805.
- ANGELIDAKI, I. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. **Wat. Res.**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 727–731, 1994.
- ANGELIDAKI, I. *et al.* Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 59, n. 5, p. 927–934, 2009. DOI: 10.2166/wst.2009.040.
- APHA. Standard Methods For Examination Of Water And Wastewater. **American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation**, [S. l.], v. 22, 1999.
- BARBOSA, Moara Yuri Utino. Reator Anaeróbio alimentado com vinhaça de cana-de-açúcar: avaliação dos efeitos causados pela interrupção na alimentação e estratégias para mitigação. **Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP**, [S. l.], p. 146, 2017.
- BEDOIC, Robert *et al.* Green biomass to biogas – A study on anaerobic digestion of residue grass. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 213, p. 700–709, 2019. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.224. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261833943X>. Acesso em: 3 fev. 2019.
- BOHRZ, GABRIELI IRRIGARAY. **Geração De Metano Em Lagoa Anaeróbia: Um Estudo De Caso Em Abatedouro De Bovinos.** 2010. [S. l.], 2010.
- CARVALHO, A. R. *et al.* Water-energy nexus: Anaerobic co-digestion with elephant grass hydrolyzate. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 181, p. 48–53, 2016. DOI: 10.1016/J.JENVMAN.2016.06.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716303516>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- CARVALHO, Guilherme Busi. **Caracterização da produção de biomassa de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.), cv. Cameroon, em função da adubação nitrogenada e irrigação em região semiárida.** 2014. [S. l.], 2014.
- CETESB. VINHAÇA – CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA APLICAÇÃO NO SOLO AGRÍCOLA. [S. l.], p. 1–12, 2006.

CHEN, Ye; CHENG, Jay J.; CREAMER, Kurt S. Inhibition of anaerobic digestion process : A review. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 99, p. 4044–4064, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.01.057.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997.

CONAB. Follow-up of the Brazilian harvest: Sugarcane. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Cana-de-açúcar**, [S. l.], p. 70, 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar%3E>. Acesso em: 23 fev. 2019.

COOK, Sherri Met *et al.*. A stability assessment tool for anaerobic codigestion. **Water Research**, [S. l.], v. 112, p. 19–28, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.027. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.027>.

COSTA, Antonio Marcos Tubiana De. **Codigestão anaeróbia de resíduos bovinos e suínos: caracterização química e produção de biofertilizante para uso em cultura de milho**. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2014.

CREMONEZ, Paulo A. *et al.*. Codigestão de água residual de suinocultura e vinhaça sob diferentes condições térmicas. **Revista de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 103–110, 2015.

DAMRONGSAK, Det; CHAICHANA, Chatchawan; WONGSAPAI, Wongkot. Small-Scale Biogas Plant from Swine Farm in Northern Thailand. *In*: ENERGY PROCEDIA 2017, **Anais [...]**. : Elsevier, 2017. p. 165–169. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.031. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217354371>. Acesso em: 19 set. 2018.

DUBOIS. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Anal. Chem.**, [S. l.], n. 28, p. 350–356, 1956.

ESPAÑA-GAMBOA, Elda *et al.*. Vinasses: characterization and treatments. **Waste Management & Research**, [S. l.], v. 29, n. 12, p. 1235–1250, 2011. DOI: 10.1177/0734242X10387313. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X10387313>. Acesso em: 4 fev. 2019.

FAVARE, Henrique Guimarães De *et al.*. Effect of Elephant Grass Genotypes to Bioenergy Production. **Journal of Experimental Agriculture International**, [S. l.], v. 38, n. April, p. 1–11, 2019. DOI: 10.9734/jeai/2019/v38i130289.

FERREIRA, L. R. A. *et al.*. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 94, p. 440–455, 2018. DOI: 10.1016/J.RSER.2018.06.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304702>. Acesso em: 11 dez. 2018.

SANTOS FILHO, Elvan Nascimento dos. **Produção de metano com resíduos de biotério utilizando fluido ruminal como inóculo**. 2015. Dissertação? (grau?) - Curso? Universidade Federal de Alagoas, [S. l.], 2015. Colocar na ordem alfabética - não sei mudar

FITZGIBBON, Francis *et al.*. The effect of phenolic acids and molasses spent wash concentration on distillery wastewater remediation by fungi. **Process Biochemistry**, [S. l.], v. Vol. 33, n. No. 8., p. 799- 803., 1998.

FLORENTINO, Helenice de Oliveira; BISCARO, Adriana de Fátima Vilela; PASSOS, José Raimundo de Souza. Funções sigmoidais aplicadas na determinação da atividade metanogênica específica. **Rev. Bras. Biom.**, [S. l.], v. 28, p. 141–150, 2010.

FONTOURA, Carlos Frederico; BRANDÃO, Luiz E.; GOMES, Leonardo Lima. Elephant grass biorefineries: Towards a cleaner Brazilian energy matrix? **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 96, p. 85–93, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.02.062. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.062>.

FUESS, Lucas Tadeu *et al.* Diversifying the technological strategies for recovering bioenergy from the two-phase anaerobic digestion of sugarcane vinasse: An integrated techno-economic and environmental approach. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 122, p. 674–687, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.003>.

GAO, Mingxue *et al.* Biogas potential, utilization and countermeasures in agricultural provinces: A case study of biogas development in Henan Province, China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 99, n. May 2018, p. 191–200, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.005>.

GRANATO, Eder. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. 2003. [S. l.], 2003. GRANATO, Eder Fonzar. Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça. 2003. 124 f. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90820>.

HANNA, Wayne W. *et al.* Warm-Season (C4) Grasses. [S. l.], v. 13, n. 45, p. 503–535, 2004.

HARYANTO, Agus *et al.* Biogas production from anaerobic codigestion of cowdung and elephant grass (*Pennisetum Purpureum*) using batch digester. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S. l.], v. 141, n. 1, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/141/1/012011.

HASSUDA, Seiju; REBOUÇAS, Aldo da Cunha; CUNHA, Rodrigo César de Araújo. Aspectos qualitativos da infiltração da vinhaça de cana no aquífero Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 5–20, 2013. DOI: 10.5935/0100-929x.19900009.

HESAMI, Seyed Mehdi *et al.* Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 76, p. 449–455, 2015. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.018>.

HIMANSHU, H. *et al.* Antagonistic effects on biogas and methane output when co-digesting cattle and pig slurries with grass silage in in vitro batch anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 109, n. December 2017, p. 190–198, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.12.027. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.027>.

HOLLIGER, Christof *et al.* Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016. DOI: 10.2166/wst.2016.336.

HUANG, Chao *et al.* Anaerobic digestion of elephant grass hydrolysate: Biogas production, substrate metabolism and outlet effluent treatment. **Bioresour. Technology**, [S. l.], v. 283, n. 2, p. 191–197, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.079. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.079>.

KAINTHOLA, Jyoti; KALAMDHAD, Ajay S.; GOUD, Vaibhav V. Enhanced methane

production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 125, n. September 2018, p. 8–16, 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.04.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.011>.

KAPOOR, Manali *et al.* Pilot scale dilute acid pretreatment of rice straw and fermentable sugar recovery at high solid loadings. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 224, p. 688–693, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.11.032. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.032>.

KARIYAMA, Ibrahim Denka; ZHAI, Xiaodong; WU, Binxin. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: A review. **Water Research**, [S. l.], v. 143, p. 503–517, 2018. DOI: 10.1016/J.WATRES.2018.06.065. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418305256>. Acesso em: 6 fev. 2019.

LAIME, E. M. O. *et al.* Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **R. Trop. Ci. Agr. Biol.**, [S. l.], v. 5, p. 16–29, 2011.

LAPA, K. L. **Avaliação da recirculação da fase líquida e do regime de alimentação no reator anaeróbio, em escala piloto, operado em bateladas sequenciais contendo biomassa imobilizada (ASBBR), no tratamento de esgoto sanitário.** 2006. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [S. l.], 2006.

LEHTOMÄKI, Annimari. **Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues.** 2006. [S. l.], 2006. Disponível em: <https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/13152>.

LI, Yue; CHEN, Yinguang; WU, Jiang. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process : A review. **Applied Energy**, [S. l.], v. 240, n. June 2018, p. 120–137, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.243. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>.

LIRA, M. A. *et al.* Capim Elefante: fundamentos e perspectivas. **Recife: IPA/UFRPE**, [S. l.], p. 229, 2010.

LYU, Zhe *et al.* **Current Biology**, [S. l.], v. 28, n. 13, p. R727–R732, 2018. DOI: 10.1016/J.CUB.2018.05.021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982218306237>. Acesso em: 6 fev. 2019.

MAINTINGUER, Sandra I. *et al.* Fermentative hydrogen production by microbial consortium. **Hydrogen Energy**, [S. l.], v. 33, p. 4309–4317, 2008. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.053.

MARAFON, Anderson Carlos. Produção de biomassa em gramíneas tropicais com potencial energético. **Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros**, [S. l.], n. April, p. 19, 2017.

MARAFON, Anderson Carlos; SALOMON, Karina Ribeiro; AMORIM, Eduardo Lucena Cavalcante; PEITER, Fernanda Santana. **Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production.** [s.l.] : Elsevier Inc., 2020. DOI: 10.1016/b978-0-12-814236-3.00010-x. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00010-X>.

MARAFON, Anderson Carlos *et al.* **Atlas de Bioenergia de Alagoas.** [s.l.] : Edufal, 2017.

MATA-ALVAREZ, J. *et al.* A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 36, n. August, p. 412–427, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.039. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>.

MAUAD, Frederico Fábio; FERREIRA, Luciana da Costa; TRINDADE, Tatiana Costa Guimarães. **Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.11606/9788580230529. no texto é 2017

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. [s.l.: s.n.].no texto é 2016

MEYSTRE, Josué de Almeida. **Partida de um reator UASB, em escala piloto, para tratamento de efluente doméstico: estudo de caso para a região da Serra da Mantiqueira**. 2007. [S. l.], 2007.

MOMAYEZ, Forough; KARIMI, Keikhosro; TAHERZADEH, Mohammad J. Energy recovery from industrial crop wastes by dry anaerobic digestion: A review. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 129, p. 673–687, 2019. DOI: 10.1016/J.INDCROP.2018.12.051. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018311038>. Acesso em: 6 fev. 2019.

MORAES, B. S. *et al.* Biogas production within the bioethanol production chain: Use of co-substrates for anaerobic digestion of sugar beet vinasse. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 190, p. 227–234, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.089. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.089>.

MORAES, Bruna S; ZAIAT, Marcelo; BONOMI, Antonio. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil : Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 44, p. 888–903, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>.

MORAIS, Joao Paulo Saraiva et Al. Procedimentos para Análise Lignocelulósica. **Embrapa**, [S. l.], p. 54, 2010.

MUNIZ, Joel Augusto *et al.* Modelos não lineares ajustados à produção acumulada de biogás provenientes de camas sobrepostas de suínos. **Revista Agrogeoambiental**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 91–104, 2018.

MUROVEC, Boštjan; KOLBL, Sabina; STRES, Blaž. Methane Yield Database: Online infrastructure and bioresource for methane yield data and related metadata. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 189, p. 217–223, 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.021.

NESHAT, Soheil A. *et al.* Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 79, p. 308–322, 2017. DOI: 10.1016/J.RSER.2017.05.137. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307694>. Acesso em: 11 dez. 2018.

NETO, João Alberto Lelis. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, [S. l.], 2008.

NOGUEIRA, Carlos E. C. *et al.* Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State , Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 48, p. 300–305, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.023>.

OLIVEIRA, R. A. **Efeito das concentrações dos sólidos suspensos do efluente no**

desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura. 1997. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [S. l.], 1997.

PANIGRAHI, Sagarika; SHARMA, Hari Bhakta; DUBEY, Brajesh K. Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: A comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 243, p. 118480, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118480. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118480>.

PARANHOS, Aline Gomes de Oliveira *et al.* Methane production by co-digestion of poultry manure and lignocellulosic biomass: Kinetic and energy assessment. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 300, p. 122588, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122588. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122588>.

PARNAUDEAU, V. *et al.* Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 99, n. 6, p. 1553–1562, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.04.012.

PARSAEE, Mostafa; KIANI DEH KIANI, Mostafa; KARIMI, Keikhosro. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 122, p. 117–125, 2019. DOI: 10.1016/J.BIOMBIOE.2019.01.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953419300431>. Acesso em: 4 fev. 2019.

PEREIRA... *et al.* 2010 (consta à página 22)

PROSAB. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. **Prosab**, [S. l.], n. 1, p. 436, 1999.

QUESADA, Diego Mureb *et al.* Parâmetros Qualitativos de Genótipos de Capim Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) estudados para a produção de energia através da Biomassa. **Circular Técnica**, [S. l.], p. 4, 2004. Disponível em: <http://www.cnpab.embrapa.br/system/files/cit008.pdf>.

RAMOS-SUÁREZ, J. L. *et al.* Biogas from animal manure: A sustainable energy opportunity in the Canary Islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 104, n. January, p. 137–150, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.025>.

RAO, P. Venkateswara *et al.* Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 14, n. 7, p. 2086–2094, 2010. DOI: 10.1016/j.rser.2010.03.031. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.031>.

REIS, Matheus Costa Dos. **Potencial de utilização da seleção recorrente na população de capim elefante hexaplóide.** 2005. Universidade Federal de Lavras, [S. l.], 2005.

ROCHA, João Romero do Amaral Santos de Carvalho *et al.* Bioenergetic potential and genetic diversity of elephantgrass via morpho-agronomic and biomass quality traits. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 95, p. 485–492, 2017. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.10.060. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.060>.

SALOMON, Karina Riberio. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.

Universidade Federal De Itajubá, [S. l.], p. 247, 2007. DOI: 10.1590/S1415-43662007000600006.

SAMSON, Roger *et al.* The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT Industry. **Critical Reviews in Plant Sciences**, [S. l.], v. 24, n. 5–6, p. 461–495, 2005. DOI: 10.1080/07352680500316508.

SAWASDEE, Vanatpornratt; PISUTPAISAL, Nipon. Feasibility of biogas production from napier grass. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 61, p. 1229–1233, 2014. a. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.1064.

SAWASDEE, Vanatpornratt; PISUTPAISAL, Nipon. Feasibility of Biogas Production from Napier Grass. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 61, p. 1229–1233, 2014. b. DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2014.11.1064. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021402894X>. Acesso em: 11 dez. 2018.

SCARLAT, Nicolae; DALLEMAND, Jean François; FAHL, Fernando. Biogas: Developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 129, p. 457–472, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>.

SEGUCHI, Henrique Jun Muramatsu *et al.* Custo De Produção Do Capim Elefante E Eucalipto. **Revista Brasileira de Energias Renovaveis**, [S. l.], 2017.

SHAH, Fayyaz Ali *et al.* Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 42, p. 627–642, 2015. DOI: 10.1016/J.RSER.2014.10.053. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008788>. Acesso em: 6 fev. 2019.

SIDDIQUE, Md. Nurul Islam; WAHID, Zularisam Ab. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 194, p. 359–371, 2018. a. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.155. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618314951>. Acesso em: 11 dez. 2018.

SIDDIQUE, Md Nurul Islam; WAHID, Zularisam Ab. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 194, p. 359–371, 2018. b. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.155.

SIMÕES, André Luis Gomes. **Estudo da aclimação de lodos anaeróbios como estratégia de inoculação para partida de biometanizadores alimentados com fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2017. Universidade de São Paulo, [S. l.], 2017. DOI: 10.1002/ejsp.2570.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. 2007. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [S. l.], 2007.

TORQUATO; JESUS, 2015

VICH, Daniele Vital. Atividade Metanogênica E Comunidade Microbiana Envolvida Na Degradação De Metilamina. [S. l.], p. 91, 2006.

VON ESPERLING, Marcos. **Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1996.

- WARD, Alastair J. *et al.* Bioresource Technology Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *[S. l.]*, v. 99, p. 7928–7940, 2008. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.02.044.
- WEILAND, Peter. Biogas production: Current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, *[S. l.]*, v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010. DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7.
- WILAWAN, W.; PHOLCHAN, P.; AGGARANGSI, P. Biogas production from co-digestion of Pennisetum purpureum cv. Pakchong 1 grass and layer chicken manure using completely stirred tank. **Energy Procedia**, *[S. l.]*, v. 52, n. December, p. 216–222, 2014. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.072.
- WILKIE, Ann C.; RIEDESEL, Kelly J.; OWENS, John M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, *[S. l.]*, v. 19, n. 2, p. 63–102, 2000. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00017-9.
- WU, Di *et al.* Anaerobic digestion: A review on process monitoring. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, *[S. l.]*, v. 103, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1016/J.RSER.2018.12.039. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308359>. Acesso em: 4 fev. 2019.
- XIE, Sihuang *et al.* Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization. **Bioresource Technology**, *[S. l.]*, v. 222, p. 498–512, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.10.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.015>.
- YONO, Budi *et al.* Kinetic Model of Biogas Yield Production from Vinasse at Various Initial pH : Comparison between Modified Gompertz Model and First Order Kinetic Model Kinetic Model of Biogas Yield Production from Vinasse at Various Initial pH : Comparison between Modifie. *[S. l.]*, n. April, 2014. DOI: 10.19026/rjaset.7.602.
- ZHANG, Le; LOH, Kai-Chee; ZHANG, Jingxin. Enhanced biogas production from anaerobic digestion of solid organic wastes: Current status and prospects. **Bioresource Technology Reports**, *[S. l.]*, 2018. DOI: 10.1016/J.BITEB.2018.07.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X18300689>. Acesso em: 11 dez. 2018.
- ZIEGLER, Miguelangelo; BIANCHIN, Wagner. Produção de biomassa e avaliação bromatológica de cultivares de capim elefante Pennisetum Purpureum Schum. no período Outono Inverno. **Nucleus Animalium**, *[S. l.]*, v. 11, n. 2, p. 109–122, 2019. DOI: 10.3738/21751463.3645.
- ZOU, Xingxing *et al.* Improving conversion of Spartina alterniflora into biogas by co-digestion with cow feces. **Fuel Processing Technology**, *[S. l.]*, v. 91, n. 11, p. 1416–1421, 2010. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.05.015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.015>.

ANEXO A - Resultados cromatografia (Ensaio I)

A1						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	146854	0,135	0,135	3,431	3,431	3,195
2	52124	0,048	0,183	1,218	4,649	4,328
3	1282130	1,180	1,363	29,954	34,603	32,218
4	0	0,000	1,363	0,000	34,603	32,218
5	553044	0,509	1,871	12,921	47,523	44,249
6	201720	0,186	2,057	4,713	52,236	48,637
7	610779	0,562	2,619	14,269	66,505	61,923
8	200334	0,184	2,803	4,680	71,186	66,281
9	851746	0,784	3,587	19,899	91,085	84,809
10	350059	0,322	3,909	8,178	99,263	92,424
11	215755	0,198	4,107	5,041	104,304	97,117
12	660983	0,608	4,715	15,442	119,746	111,495
13	397390	0,366	5,081	9,284	129,030	120,140
14	587796	0,541	5,622	13,732	142,763	132,926
16	151585	0,139	5,761	3,541	146,304	136,223
18	408478	0,376	6,137	9,543	155,847	145,109
20	12932	0,012	6,149	0,302	156,149	145,390
22	272496	0,251	6,400	6,366	162,515	151,318
25	587870	0,541	6,941	13,734	176,250	164,106
27	1334409	1,228	8,168	31,175	207,425	193,133
29	90539	0,083	8,252	2,115	209,540	195,103

A2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	108688	0,100	0,100	2,539	2,539	2,364
2	836076	0,769	0,869	19,533	22,072	20,551
3	1272617	1,171	2,040	29,732	51,804	48,235
4	66265	0,061	2,101	1,548	53,352	49,676
5	836255	0,769	2,870	19,537	72,889	67,867
6	16668	0,015	2,886	0,389	73,279	68,230
7	633816	0,583	3,469	14,808	88,086	82,017
8	707421	0,651	4,120	16,527	104,613	97,405
9	1705893	1,569	5,689	39,854	144,468	134,514
10	169121	0,156	5,845	3,951	148,419	138,192

A2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
11	153121	0,141	5,985	3,577	151,996	141,523
12	841598	0,774	6,760	19,662	171,658	159,831
13	298390	0,275	7,034	6,971	178,629	166,321
14	47186	0,043	7,078	1,102	179,732	167,348
16	225799	0,208	7,285	5,275	185,007	172,260
18	538185	0,495	7,781	12,573	197,580	183,967
20	66664	0,061	7,842	1,557	199,138	185,417
22	218559	0,201	8,043	5,106	204,244	190,171
25	181638	0,167	8,210	4,244	208,487	194,122
27	710557	0,654	8,864	16,600	225,088	209,579
29	47786	0,044	8,908	1,116	226,204	210,619

A3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	70569	0,065	0,065	1,649	1,649	1,535
2	620840	0,571	0,636	14,504	16,153	15,040
3	103841	0,096	0,732	2,426	18,579	17,299
4	185439	0,171	0,902	4,332	22,911	21,333
5	1130789	1,040	1,943	26,418	49,330	45,931
6	148178	0,136	2,079	3,462	52,792	49,154
7	464240	0,427	2,506	10,846	63,637	59,253
8	903055	0,831	3,337	21,098	84,735	78,897
9	1970568	1,813	5,150	46,038	130,773	121,762
10	321385	0,296	5,445	7,508	138,281	128,754
11	399397	0,367	5,813	9,331	147,612	137,442
12	151940	0,140	5,953	3,550	151,162	140,747
13	665554	0,612	6,565	15,549	166,711	155,225
14	230824	0,212	6,777	5,393	172,104	160,246
16	133052	0,122	6,900	3,108	175,212	163,140
18	260845	0,240	7,140	6,094	181,306	168,814
20	434033	0,399	7,539	10,140	191,446	178,256
22	102184	0,094	7,633	2,387	193,834	180,478
25	491119	0,452	8,085	11,474	205,308	191,162
27	767157	0,706	8,791	17,923	223,230	207,850
29	60276	0,055	8,846	1,408	224,639	209,161

B1						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	1442277	1,32689484	1,32689484	33,695	33,695	38,999
2	2217034	2,03967128	3,36656612	51,796	85,491	98,948
3	842760	0,7753392	4,14190532	19,689	105,180	121,736
4	269417	0,24786364	4,38976896	6,294	111,475	129,022
5	47169	0,04339548	4,43316444	1,102	112,577	130,297
6	531039	0,48855588	4,92172032	12,406	124,983	144,656
7	731850	0,673302	5,59502232	17,098	142,081	164,446
8	910619	0,83776948	6,4327918	21,274	163,356	189,069
9	194831	0,17924452	6,61203632	4,552	167,907	194,337
10	9410	0,0086572	6,62069352	0,220	168,127	194,592
11	23918	0,02200456	6,64269808	0,559	168,686	195,238
12	235603	0,21675476	6,85945284	5,504	174,190	201,609
13	192861	0,17743212	7,03688496	4,506	178,696	206,824
14	294270	0,2707284	7,30761336	6,875	185,571	214,781
16	591253	0,54395276	7,85156612	13,813	199,384	230,769
18	1217390	1,1199988	8,97156492	28,441	227,826	263,687
20	10215	0,0093978	8,98096272	0,239	228,064	263,963
22	13426	0,01235192	8,99331464	0,314	228,378	264,326
25	1295888	1,19221696	10,1855316	30,275	258,653	299,367
27	667287	0,61390404	10,79943564	15,590	274,243	317,411
29	7526	0,00692392	10,80635956	0,176	274,419	317,614

B3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	742514	0,68311288	0,68311288	17,347	17,347	20,078
2	1297936	1,19410112	1,877214	30,323	47,670	55,174
3	1206621	1,11009132	2,98730532	28,190	75,860	87,801
4	230958	0,21248136	3,19978668	5,396	81,256	94,046
5	746073	0,68638716	3,88617384	17,430	98,686	114,220
6	23567	0,02168164	3,90785548	0,551	99,237	114,857
7	701457	0,64534044	4,55319592	16,388	115,625	133,825
8	1288496	1,18541632	5,73861224	30,103	145,727	168,666
9	1745885	1,6062142	7,34482644	40,789	186,516	215,875
10	112300	0,103316	7,44814244	2,624	189,140	218,912
11	267658	0,24624536	7,6943878	6,253	195,393	226,149
12	2053670	1,8893764	9,5837642	47,979	243,372	281,680

B3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
13	212166	0,19519272	9,77895692	4,957	248,329	287,417
14	589392	0,54224064	10,32119756	13,770	262,098	303,355
16	308647	0,28395524	10,6051528	7,211	269,309	311,701
18	165258	0,15203736	10,75719016	3,861	273,170	316,169
20	84543	0,07777956	10,83496972	1,975	275,145	318,455
22	292238	0,26885896	11,10382868	6,827	281,973	326,357
25	1850782	1,70271944	12,80654812	43,239	325,212	376,403
27	1329412	1,22305904	14,02960716	31,059	356,271	412,350
29	440810	0,4055452	14,43515236	10,298	366,569	424,270

C1						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	1861608	1,71267936	1,71267936	43,492	43,492	66,502
2	1424973	1,31097516	3,02365452	33,291	76,783	117,406
3	1428721	1,31442332	4,33807784	33,379	110,162	168,443
4	204705	0,1883286	4,52640644	4,782	114,944	175,756
5	1755	0,0016146	4,52802104	0,041	114,985	175,819
6	127578	0,11737176	4,6453928	2,981	117,966	180,376
7	286381	0,26347052	4,90886332	6,691	124,657	190,606
8	368290	0,3388268	5,24769012	8,604	133,261	203,763
9	42816	0,03939072	5,28708084	1,000	134,261	205,292
10	45602	0,04195384	5,32903468	1,065	135,327	206,921
11	119376	0,10982592	5,4388606	2,789	138,115	211,186
12	235297	0,21647324	5,65533384	5,497	143,613	219,591
13	15081	0,01387452	5,66920836	0,352	143,965	220,130
14	22694	0,02087848	5,69008684	0,530	144,495	220,941
16	1977	0,00181884	5,69190568	0,046	144,541	221,011
18	1637	0,00150604	5,69341172	0,038	144,580	221,070
20	0	0	5,69341172	0,000	144,580	221,070
22	1066	0,00098072	5,69439244	0,025	144,604	221,108
25	19005	0,0174846	5,71187704	0,444	145,048	221,787
27	9264	0,00852288	5,72039992	0,216	145,265	222,118
29	1586	0,00145912	5,72185904	0,037	145,302	222,174

C2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	1526222	1,40412424	1,40412424	35,657	35,657	54,521
2	1610660	1,4818072	2,88593144	37,629	73,286	112,058
3	1279169	1,17683548	4,06276692	29,885	103,171	157,753
4	819777	0,75419484	4,81696176	19,152	122,323	187,038
5	942417	0,86702364	5,6839854	22,017	144,340	220,704
6	261310	0,2404052	5,9243906	6,105	150,445	230,038
7	308709	0,28401228	6,20840288	7,212	157,657	241,066
8	650559	0,59851428	6,80691716	15,199	172,856	264,306
9	991909	0,91255628	7,71947344	23,174	196,030	299,740
10	24848	0,02286016	7,7423336	0,581	196,610	300,627
11	49345	0,0453974	7,787731	1,153	197,763	302,390
12	159114	0,14638488	7,93411588	3,717	201,480	308,074
13	5240	0,0048208	7,93893668	0,122	201,603	308,261
14	5385	0,0049542	7,94389088	0,126	201,729	308,454
16	0	0	7,94389088	0,000	201,729	308,454
18	1430	0,0013156	7,94520648	0,033	201,762	308,505
20	1129	0,00103868	7,94624516	0,026	201,788	308,545
22	0	0	7,94624516	0,000	201,788	308,545
25	14044	0,01292048	7,95916564	0,328	202,117	309,047
27	17231	0,01585252	7,97501816	0,403	202,519	309,662
29	0	0	7,97501816	0,000	202,519	309,662

C3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	2021373	1,85966316	1,85966316	47,225	47,225	72,209
2	1193178	1,09772376	2,95738692	27,876	75,100	114,832
3	1087083	1,00011636	3,95750328	25,397	100,498	153,666
4	19463	0,01790596	3,97540924	0,455	100,952	154,361
5	31499	0,02897908	4,00438832	0,736	101,688	155,487
6	2206	0,00202952	4,00641784	0,052	101,740	155,565
7	84018	0,07729656	4,0837144	1,963	103,703	158,567
8	39280	0,0361376	4,119852	0,918	104,620	159,970
9	26189	0,02409388	4,14394588	0,612	105,232	160,905
10	5102	0,00469384	4,14863972	0,119	105,351	161,088
11	385	0,0003542	4,14899392	0,009	105,360	161,101
12	17536	0,01613312	4,16512704	0,410	105,770	161,728

C3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
13	4560	0,0041952	4,16932224	0,107	105,877	161,891
14	4277	0,00393484	4,17325708	0,100	105,976	162,044
16	0	0	4,17325708	0,000	105,976	162,044
18	1315	0,0012098	4,17446688	0,031	106,007	162,091
20	0	0	4,17446688	0,000	106,007	162,091
22	0	0	4,17446688	0,000	106,007	162,091
25	16569	0,01524348	4,18971036	0,387	106,394	162,682
27	10881	0,01001052	4,19972088	0,254	106,649	163,071
29	0	0	4,19972088	0,000	106,649	163,071

D1						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	13071	0,01202532	0,01202532	0,305	0,305	0,615
2	169499	0,15593908	0,1679644	3,960	4,265	8,590
3	23951	0,02203492	0,18999932	0,560	4,825	9,717
5	67543	0,06213956	0,25213888	1,578	6,403	12,894
6	84433	0,07767836	0,32981724	1,973	8,375	16,867
9	147505	0,1357046	0,46552184	3,446	11,822	23,807
10	85172	0,07835824	0,54388008	1,990	13,811	27,814
13	43945	0,0404294	0,58430948	1,027	14,838	29,882
15	257842	0,23721464	0,82152412	6,024	20,862	42,013
17	41626	0,03829592	0,85982004	0,972	21,834	43,971
19	101320	0,0932144	0,95303444	2,367	24,202	48,738
22	256391	0,23587972	1,18891416	5,990	30,192	60,801
24	312541	0,28753772	1,47645188	7,302	37,493	75,506
35	36643	0,03371156	1,51016344	0,856	38,349	77,230
37	91458	0,08414136	1,5943048	2,137	40,486	81,533
39	62431	0,05743652	1,65174132	1,459	41,945	84,470

D2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	106431	0,09791652	0,09791652	2,487	1,630	3,282
2	69750	0,06417	0,16208652	1,630	3,259	6,563

D2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
3	9615	0,0088458	0,17093232	0,225	3,484	7,016
5	76576	0,07044992	0,24138224	1,789	5,273	10,619
6	120594	0,11094648	0,35232872	2,817	8,090	16,292
9	119054	0,10952968	0,4618584	2,781	10,872	21,894
10	49991	0,04599172	0,50785012	1,168	12,039	24,246
13	120928	0,11125376	0,61910388	2,825	14,865	29,935
15	78773	0,07247116	0,69157504	1,840	16,705	33,641
17	170398	0,15676616	0,8483412	3,981	20,686	41,659
19	113607	0,10451844	0,95285964	2,654	23,340	47,004
22	543701	0,50020492	1,45306456	12,702	36,042	72,584
24	174767	0,16078564	1,6138502	4,083	40,125	80,807
35	22106	0,02033752	1,63418772	0,516	40,642	81,847
37	24215	0,0222778	1,65646552	0,566	41,208	82,986
39	180356	0,16592752	1,82239304	4,214	45,421	91,472

D3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	9708	0,00893136	0,00893136	0,227	0,227	0,457
2	320628	0,29497776	0,30390912	7,491	7,718	15,542
3	449034	0,41311128	0,7170204	10,491	18,208	36,669
5	21947	0,02019124	0,73721164	0,513	18,721	37,701
6	180272	0,16585024	0,90306188	4,212	22,933	46,183
9	45292	0,04166864	0,94473052	1,058	23,991	48,314
10	23937	0,02202204	0,96675256	0,559	24,550	49,440
13	87333	0,08034636	1,04709892	2,040	26,590	53,549
15	30503	0,02806276	1,07516168	0,713	27,303	54,984
17	239210	0,2200732	1,29523488	5,589	32,891	66,239
19	143427	0,13195284	1,42718772	3,351	36,242	72,987
22	119994	0,11039448	1,5375822	2,803	39,046	78,632
24	101691	0,09355572	1,63113792	2,376	41,421	83,417
35	30105	0,0276966	1,65883452	0,703	42,125	84,833
37	66192	0,06089664	1,71973116	1,546	43,671	87,947
39	23727	0,02182884	1,74156	0,554	44,226	89,064

E1						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	0	0	0	0,000	0,000	0,000
2	16125	0,014835	0,014835	0,377	0,377	1,345
3	0	0	0,014835	0,000	0,377	1,345
5	0	0	0,014835	0,000	0,377	1,345
6	4341	0,00399372	0,01882872	0,101	0,478	1,708
9	0	0	0,01882872	0,000	0,478	1,708
10	1760	0,0016192	0,02044792	0,041	0,519	1,854
13	4734	0,00435528	0,0248032	0,111	0,630	2,249
15	0	0	0,0248032	0,000	0,630	2,249
17	1073	0,00098716	0,02579036	0,025	0,655	2,339
19	14307	0,01316244	0,0389528	0,334	0,989	3,533
22	0	0	0,0389528	0,000	0,989	3,533
24	6207	0,00571044	0,04466324	0,145	1,134	4,051
35	6207	0,00571044	0,05037368	0,145	1,279	4,569
37	2876	0,00264592	0,0530196	0,067	1,346	4,809
39	6875	0,006325	0,0593446	0,161	1,507	5,382

E2						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	4431	0,00407652	0,00407652	0,104	0,104	0,370
2	29327	0,02698084	0,03105736	0,685	0,789	2,817
3	26697	0,02456124	0,0556186	0,624	1,412	5,044
5	7128	0,00655776	0,06217636	0,167	1,579	5,639
6	3016	0,00277472	0,06495108	0,070	1,649	5,891
9	0	0	0,06495108	0,000	1,649	5,891
10	3502	0,00322184	0,06817292	0,082	1,731	6,183
13	5907	0,00543444	0,07360736	0,138	1,869	6,676
15	9176	0,00844192	0,08204928	0,214	2,084	7,441
17	5920	0,0054464	0,08749568	0,138	2,222	7,935
19	10643	0,00979156	0,09728724	0,249	2,471	8,823
22	10771	0,00990932	0,10719656	0,252	2,722	9,722
24	5601	0,00515292	0,11234948	0,131	2,853	10,189
35	5601	0,00515292	0,1175024	0,131	2,984	10,657
37	11334	0,01042728	0,12792968	0,265	3,249	11,602
39	3402	0,00312984	0,13105952	0,079	3,328	11,886

E3						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	4431	0,00407652	0,00407652	0,104	0,104	0,370
2	17089	0,01572188	0,0197984	0,399	0,503	1,796
3	0	0	0,0197984	0,000	0,503	1,796
5	1099	0,00101108	0,02080948	0,026	0,528	1,887
6	2216	0,00203872	0,0228482	0,052	0,580	2,072
9	0	0	0,0228482	0,000	0,580	2,072
10	7525	0,006923	0,0297712	0,176	0,756	2,700
13	12525	0,011523	0,0412942	0,293	1,049	3,745
15	0	0	0,0412942	0,000	1,049	3,745
17	1304	0,00119968	0,04249388	0,030	1,079	3,854
19	7753	0,00713276	0,04962664	0,181	1,260	4,501
22	0	0	0,04962664	0,000	1,260	4,501
24	1351	0,00124292	0,05086956	0,032	1,292	4,614
35	1351	0,00124292	0,05211248	0,032	1,323	4,726
37	6196	0,00570032	0,0578128	0,145	1,468	5,243
39	4726	0,00434792	0,06216072	0,110	1,579	5,638

F - CONTROLE						
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)	Produção de biogás mL/gSV
1	0	0	0	0,000	0,000	0,000
2	2180	0,0020056	0,0020056	0,051	0,051	0,034
3	2103	0,00193476	0,00394036	0,049	0,100	0,067
5	9402	0,00864984	0,0125902	0,220	0,320	0,214
6	2803	0,00257876	0,01516896	0,065	0,385	0,258
9	7742	0,00712264	0,0222916	0,181	0,566	0,379
10	0	0	0,0222916	0,000	0,566	0,379
13	4845	0,0044574	0,026749	0,113	0,679	0,454
15	5775	0,005313	0,032062	0,135	0,814	0,545
17	7422	0,00682824	0,03889024	0,173	0,988	0,661
19	4530	0,0041676	0,04305784	0,106	1,093	0,731
22	7078	0,00651176	0,0495696	0,165	1,259	0,842
24	0	0	0,0495696	0,000	1,259	0,842
35	0	0	0,0495696	0,000	1,259	0,842
37	3477	0,00319884	0,05276844	0,081	1,340	0,896
39	13963	0,01284596	0,0656144	0,326	1,666	1,114

ANEXO B- Resultados cromatografia (Ensaio II)

1.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,55	1058219	1,397	1,397	35,261	35,261
0,89	1853105	2,446	3,843	61,747	97,007
1,57	2245592	2,964	6,807	74,825	171,832
1,87	2097510	2,769	9,576	69,890	241,723
2,55	1621347	2,140	11,716	54,024	295,747
2,89	1344371	1,775	13,491	44,795	340,542
3,74	530431	0,700	14,191	17,674	358,217
4,65	117348	0,155	14,346	3,910	362,127
6,65	33394	0,044	14,390	1,113	363,239
8,61	13771	0,018	14,408	0,459	363,698
10,63	2651	0,003	14,411	0,088	363,787
13,54	2563	0,003	14,415	0,085	363,872

1.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,56	967317	1,277	1,277	32,232	32,232
0,90	1841478	2,431	3,708	61,359	93,591
1,57	2003734	2,645	6,353	66,766	160,357
1,88	1930242	2,548	8,900	64,317	224,674
2,55	1686328	2,226	11,126	56,190	280,863
2,90	1191399	1,573	12,699	39,698	320,562
3,75	591959	0,781	13,480	19,724	340,286
4,65	67017	0,088	13,569	2,233	342,519
6,65	39382	0,052	13,621	1,312	343,831
8,63	4201	0,006	13,626	0,140	343,971
10,64	1320	0,002	13,628	0,044	344,015
13,55	4493	0,006	13,634	0,150	344,165

2.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,56	1338895	1,767	1,767	44,613	44,613
0,90	1999031	2,639	4,406	66,609	111,222
1,58	2283464	3,014	7,420	76,087	187,309
1,88	2329575	3,075	10,495	77,623	264,932
2,56	2297345	3,032	13,528	76,549	341,481
2,90	2536381	3,348	16,876	84,514	425,995
3,68	2587198	3,415	20,291	86,207	512,202
4,66	1706341	2,252	22,543	56,856	569,059
6,62	1371085	1,810	24,353	45,686	614,744
8,64	298279	0,394	24,747	9,939	624,683
10,64	0	0,000	24,747	0,000	624,683
13,55	0	0,000	24,747	0,000	624,683

2.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,57	1335802	1,763	1,763	44,510	44,510
0,91	1860955	2,456	4,220	62,008	106,518
1,58	2144111	2,830	7,050	71,443	177,961
1,89	2141879	2,827	9,877	71,369	249,330
2,56	2623800	3,463	13,341	87,427	336,757
2,90	2362626	3,119	16,459	78,724	415,482
3,68	1494907	1,973	18,433	49,811	465,293
4,66	1525808	2,014	20,447	50,841	516,134
6,66	1015718	1,341	21,787	33,844	549,978
8,64	130298	0,172	21,959	4,342	554,320
10,65	2676	0,004	21,963	0,089	554,409
13,55	1959	0,003	21,966	0,065	554,474

3.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,57	18577	0,025	0,025	0,619	0,619
0,91	14603	0,019	0,044	0,487	1,106
1,59	13907	0,018	0,062	0,463	1,569
1,89	4517	0,006	0,068	0,151	1,719
2,57	1725	0,002	0,070	0,057	1,777
2,91	1507	0,002	0,072	0,050	1,827
3,69	1599	0,002	0,074	0,053	1,880
4,67	1666	0,002	0,077	0,056	1,936
6,66	7880	0,010	0,087	0,263	2,199
8,65	5414	0,007	0,094	0,180	2,379
10,65	1335	0,002	0,096	0,044	2,423
13,56	7382	0,010	0,106	0,246	2,669
16,67	4019	0,005	0,111	0,134	2,803
20,57	2447	0,003	0,114	0,082	2,885

3.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,58	17206	0,023	0,023	0,573	0,573
0,92	15719	0,021	0,043	0,524	1,097
1,59	7037	0,009	0,053	0,234	1,332
1,90	6571	0,009	0,061	0,219	1,551
2,57	1317	0,002	0,063	0,044	1,594
2,91	1055	0,001	0,065	0,035	1,630
3,69	1300	0,002	0,066	0,043	1,673
4,68	1364	0,002	0,068	0,045	1,718
6,67	6466	0,009	0,077	0,215	1,934
8,65	12353	0,016	0,093	0,412	2,345
10,66	14545	0,019	0,112	0,485	2,830
13,56	3765	0,005	0,117	0,125	2,955
16,67	2758	0,004	0,121	0,092	3,047
20,57	1943	0,003	0,123	0,000	3,047

4.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,58	54041	0,071	0,071	1,801	1,801

4.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,92	1803788	2,381	2,452	60,103	61,904
1,60	2573566	3,397	5,849	85,753	147,657
1,90	2442479	3,224	9,074	81,385	229,042
2,58	1880338	2,482	11,556	62,654	291,696
2,92	1796638	2,372	13,927	59,865	351,562
3,70	1311597	1,731	15,658	43,703	395,265
4,68	232110	0,306	15,965	7,734	402,999
6,67	1957312	2,584	18,548	65,219	468,218
8,66	1921975	2,537	21,085	64,042	532,260
10,66	1759163	2,322	23,408	58,617	590,876
13,57	1819585	2,402	25,809	60,630	651,506
16,68	1754198	2,316	28,125	58,451	709,957
20,58	1777848	2,347	30,472	59,239	769,196
23,65	1686147	2,226	32,697	56,184	825,380
27,62	1855339	2,449	35,146	61,821	887,201
30,60	1495080	1,974	37,120	49,817	937,018
34,63	1571236	2,074	39,194	52,355	989,373
37,63	1579450	2,085	41,279	52,628	1042,001
41,54	1572859	2,076	43,355	52,409	1094,410
44,53	1160814	1,532	44,887	38,679	1133,089

4.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,59	43077	0,057	0,057	1,435	1,435
0,93	1563651	2,064	2,121	52,102	53,537
1,60	2776891	3,665	5,786	92,528	146,065
1,91	2577936	3,403	9,189	85,899	231,964
2,58	1848553	2,440	11,629	61,595	293,559
2,92	1662258	2,194	13,824	55,388	348,947
3,71	719602	0,950	14,773	23,978	372,924
4,69	24000	0,032	14,805	0,800	373,724
6,68	1795058	2,369	17,175	59,813	433,536
8,66	1647613	2,175	19,349	54,900	488,436
10,66	1641706	2,167	21,516	54,703	543,139
13,57	1527195	2,016	23,532	50,887	594,026
16,68	1574815	2,079	25,611	52,474	646,500

4.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
20,58	1493072	1,971	27,582	49,750	696,250
23,66	1435475	1,895	29,477	47,831	744,081
27,63	1330924	1,757	31,234	44,347	788,429
30,60	1304061	1,721	32,955	43,452	831,881
34,64	1455794	1,922	34,877	48,508	880,389
37,63	1402483	1,851	36,728	46,732	927,121
41,55	1379339	1,821	38,549	45,961	973,081
44,53	1405314	1,855	40,404	46,826	1019,907

5.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,59	38608	0,051	0,051	1,286	1,286
0,93	667711	0,881	0,932	22,249	23,535
1,60	2489433	3,286	4,218	82,950	106,485
1,91	2288298	3,021	7,239	76,248	182,732
2,59	1620710	2,139	9,378	54,003	236,736
2,93	1573308	2,077	11,455	52,424	289,159
3,71	1168031	1,542	12,997	38,920	328,079
4,69	91848	0,121	13,118	3,060	331,139
6,68	3054665	4,032	17,150	101,784	432,923
8,67	1755997	2,318	19,468	58,511	491,434
10,67	166840	0,220	19,688	5,559	496,993
13,58	11324	0,015	19,703	0,377	497,370
16,66	45007	0,059	19,763	1,500	498,870
20,56	26603	0,035	19,798	0,886	499,757
23,66	27462	0,036	19,834	0,915	500,672
27,63	26450	0,035	19,869	0,881	501,553
30,61	26850	0,035	19,904	0,895	502,448

5.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no headspace (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume headspace (mL)	Volume acumulado (mL)
0,60	30425	0,040	0,040	1,014	1,014
0,94	287252	0,379	0,419	9,571	10,585
1,61	2380276	3,142	3,561	79,312	89,898

5.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)
1,92	2257140	2,979	6,541	75,209	165,107
2,59	1600137	2,112	8,653	53,318	218,425
2,93	1349638	1,782	10,434	44,971	263,396
3,72	1082440	1,429	11,863	36,068	299,463
4,70	98934	0,131	11,994	3,297	302,760
6,69	1563811	2,064	14,058	52,107	354,867
8,67	1350692	1,783	15,841	45,006	399,873
10,67	1340666	1,770	17,611	44,672	444,545
13,58	1374837	1,815	19,425	45,811	490,356
16,66	1714756	2,263	21,689	57,137	547,492
20,56	2683117	3,542	25,231	89,403	636,896
23,67	1160636	1,532	26,763	38,673	675,569
27,64	52453	0,069	26,832	1,748	677,317
30,61	2683117	3,542	30,374	89,403	766,720
34,64	36513	0,048	30,422	1,217	767,937
37,62	28918	0,038	30,460	0,964	768,900

6.1					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)
0,60	19153	0,025	0,025	0,638	0,638
0,94	182582	0,241	0,266	6,084	6,722
1,61	1171110	1,546	1,812	39,022	45,744
1,92	1457174	1,923	3,736	48,554	94,298
2,59	2725800	3,598	7,334	90,826	185,124
2,94	2210533	2,918	10,252	73,656	258,780
3,72	634702	0,838	11,089	21,149	279,929
4,70	220463	0,291	11,380	7,346	287,275
6,70	28468	0,038	11,418	0,949	288,224
8,68	16045	0,021	11,439	0,535	288,758
10,68	174670	0,231	11,670	5,820	294,578
13,59	58218	0,077	11,747	1,940	296,518

6.2					
Dias	Área cromatográfica do metano	Concentração de metano no <i>headspace</i> (mmol)	Concentração de metano acumulada (mmol)	Volume <i>headspace</i> (mL)	Volume acumulado (mL)
0,61	11409	0,015	0,015	0,380	0,380
0,95	296415	0,391	0,406	9,877	10,257
1,62	1288996	1,701	2,108	42,950	53,207
1,93	2711311	3,579	5,687	90,343	143,550
2,60	3039894	4,013	9,699	101,291	244,841
2,94	2486982	3,283	12,982	82,868	327,709
3,73	1195666	1,578	14,560	39,840	367,550
4,71	12766	0,017	14,577	0,425	367,975
6,70	69469	0,092	14,669	2,315	370,290
8,68	30584	0,040	14,709	1,019	371,309
10,68	22617	0,030	14,739	0,754	372,063
13,59	14873	0,020	14,759	0,496	372,558

ANEXO C- CURVA DE METANO