



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIÁS



Mestrado Profissional em
Tecnologia de Processos
Sustentáveis



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

IFG - CAMPUS GOIÂNIA

MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Grace Cury Hoffmann

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE BIODIGESTORES
DE LAGOA COBERTA ALIMENTADOS COM DEJETO SUÍNO**

Goiânia, 2019

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUACAO
IFG - CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Grace Cury Hoffmann

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE BIODIGESTORES
DE LAGOA COBERTA ALIMENTADOS COM DEJETO SUÍNO**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPG-TPS- IFG) – Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

Goiânia, 2019

H7113o Hoffmann, Grace Cury.

Otimização de sistemas de produção de biogás de biodigestores de lagoa coberta alimentados com dejetos suínos / Grace Cury Hoffmann. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.

88f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Biogás. 2. Biodigestores. 3. Suinocultura. I. Oliveira, Sérgio Botelho de (orientador). II. Barbosa Junior, João Areis Ferreira (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 665.776

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: | _____ |

Nome Completo do(a) Autor(a): **GRACE CURY HOFFMANN**

Matrícula: **20172011140081**

Título do Trabalho: **OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE
BIODIGESTORES DE LAGOA COBERTA ALIMENTADOS COM DEJETO SUÍNO**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: ____/____/____

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

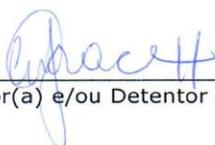
O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

GOIÂNIA, 03 DE OUTUBRO DE 2019.



Assinatura do(a) Autor(a) e/ou Detentor dos Direitos Autorais



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Grace Cury Hoffmann

**“OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE
BIODIGESTORES DE LAGOA COBERTA ALIMENTADOS COM
DEJETO SUÍNO”**

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos

Prof(a). Dr(a). SÉRGIO BOTELHO DE OLIVEIRA (presidente e orientador – PPGTPS IFG)

Assinatura _____

Prof(a). Dr(a). JOÃO AREIS FERREIRA BARBOSA JUNIOR (coorientador – IFGOIANO)

Assinatura _____

Prof(a). Dr(a). DANNS PEREIRA BARBOSA (avaliador – PPGTPS IFG)

Assinatura _____

Prof(a). Dr(a). CHRISTIAN CONÇALVES ALONSO (avaliador externo – UFG)

Assinatura _____

Prof(a). Dr(a). ANA PAULA CARDOSO GOMIDE (suplente – IFGOIANO)

Assinatura _____

Aprovação em: 03/10/2019

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha mãe Cláudia, que desde sempre me ensinou o valor do estudo e do conhecimento e que me demonstrou de forma tão sutil que eu poderia conquistar tudo que estivesse disposta a lutar para conseguir. Ao meu marido Gustavo, com quem venho descobrindo junto os caminhos para adquirir os conhecimentos necessários para ser uma pessoa melhor e ao meu filho Lionel que me fez mãe durante o processo de construção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder capacidade para realização desse trabalho, por eu ser incrivelmente abençoada e por estar sempre de mãos dadas comigo.

Ao meu orientador, Dr. Sérgio Botelho, pelos ensinamentos e por além de compartilhar todo seu conhecimento sem restrição tornou essa caminhada mais agradável com sua forma de liderança inspiradora.

Ao Gustavo, meu marido, companheiro e amigo que além do carinho, paciência e compreensão pela minha ausência nas inúmeras horas, nos finais de semana, feriados e noites que me dediquei a este trabalho, esteve sempre disponível para me ajudar nos momentos que precisei e muitas vezes deixou suas atividades para me socorrer.

À minha mãe Cláudia, e minha avó Nena, que me ensinaram valores que me orgulho de ter e me fizeram acreditar que eu poderia conquistar tudo que estivesse disposta a lutar para conseguir.

A minha família que sempre esteve comigo me apoiando e dividindo os momentos de angústia e alegria, em especial meu irmão, Me. Júlio, que me ajudou nesse processo.

Aos colegas do IF Goiano - Campus Rio Verde, Dr. João Areis (co-orientador), Dra. Ana Paula Gomide, Dr. Bruno Saleh que colaboraram com a construção desse trabalho, compartilhando seus conhecimentos e tornando possível a execução desse estudo multidisciplinar.

Aos colegas do Campus Goiânia – IFG, Paulo Vinicius e Wagner pelo apoio técnico e construção dos reatores e aos companheiros de laboratório que tanto me ajudaram Hellen, Me. Suzel (*in memoria*) e Me. Thiago que deixaram suas atividades para me auxiliar e fazem parte dos resultados desse trabalho.

Aos meus amigos do Siass IF Goiano/IFG, especialmente, Mário, Joylce, Adriana e Giuliano por tamanha compreensão e apoio, não teria conseguido conciliar tudo sem vocês.

Ao senhor Ivan Klain que nos abriu as portas, pelo pensamento a frente do tempo e a toda sua equipe, especialmente ao gerente Ronaldo sempre solícito em nos atender a qualquer hora.

Ao IF Goiano pela concessão da capacitação em serviço e da bolsa PIQ.

EPIGRAFE

“O mundo não está interessado nos temporais que você encontrou.
Ele quer saber se você trouxe o navio”

Willian McFee

Título: Otimização de sistemas de produção de biogás de biodigestores de lagoa coberta alimentados com dejetos suínos

Autor: Grace Cury Hoffmann

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

RESUMO

A energia é essencial para o desenvolvimento social e econômico de um país. A demanda energética mundial não poderá ser suprida apenas por fontes de origem fóssil, exigindo biocombustíveis eficientes, garantindo energia limpa e renovável. Neste cenário, o uso de biomassa como fonte de energia é determinante, tanto para reduzir o impacto ambiental, quanto para suprir a demanda energética. A digestão anaeróbia da biomassa proveniente de dejetos possui grande potencial para aproveitamento energético. Para explorar esse potencial com eficiência, as condições de biodigestão devem permanecer em faixa próxima das condições ideais para ação dos microrganismos, sendo a utilização dos dejetos suínos uma opção economicamente viável. O objetivo do presente trabalho foi otimizar os procedimentos operacionais para produção de biogás em biodigestores de lagoa coberta alimentados com substrato de dejetos suínos, principal tipo de biodigestor utilizado na região Sudoeste de Goiás onde se localiza o município de Rio Verde, segundo no País em contingente de suínos alojados. Para isso foi realizado diagnóstico da operação e monitoramento dos biodigestores alimentados com substrato de dejetos suínos e identificadas as técnicas de manejo dos suínos. Foram realizados testes em escala de bancada com biorreatores visando sanar os fatores limitantes identificados. Está sendo elaborado um manual prático com procedimentos operacionais para otimização desses biodigestores. Os resultados e análises obtidos em granjas da região demonstraram que os microrganismos estão subalimentados, com teor de MS no substrato de 3,93% e de MSO de 3,35%, e o teor de MSO no digestato é bem inferior ao que a literatura determina: 4%-7% de MSO, com valor médio encontrado de 0,97%. Já o índice de FOS/TAC identificado ficou entre 0,2 e 0,1, abaixo do mínimo de 0,2. Mas a qualidade do gás produzido é alta, com teor de metano médio de 69,9%. Os testes com reatores de bancada demonstraram que a codigestão é eficiente para aumentar a disponibilidade de nutrientes, pois houve aumento na produção de biogás de 50 a 80% nos biorreatores I2DSVB, I1DSB e I2DSVT, sendo os melhores resultados de produção de biogás por MSO encontrados para os biorreatores I3DSBPH e I3DSTPH onde foi combinado o uso de adição de outro inóculo para renovação da biota, o uso da codigestão e adição de vinhaça para não alcalinização do meio, se mostrando um recurso eficiente, já que o pH ao final do teste ficou abaixo de 7,9 e a concentração de nitrogênio amoniacal ficou em 439 e 422 mg.L⁻¹, abaixo da faixa de inibição, sendo quase oito vezes menor que os valores encontrados ao final do teste com os reatores I1DS e I1DSB, resultando em uma produção de biogás 200% maior que o reator I1DS. A qualidade do gás produzido nos reatores I1DSPH, I3DSBPH e I3DSTPH é alta, com teor de metano médio acima de 70%. Porém foram encontradas concentrações de cobre e zinco acima da faixa inibitória para arqueas metanogênicas, com teor de cobre entre 1.071 e 1.970 mg.kg⁻¹ de MS e de zinco entre 719 e 1.302 mg.kg⁻¹ de MS.

PALAVRAS-CHAVE: BIOMETANO, DIGESTÃO ANAERÓBIA, SUINOCULTURA, REATOR ANAERÓBIO, ENERGIA RENOVÁVEL.

TITLE: Optimization of biogas production systems of covered pond type biodigesters, fed with swine manure

AUTHOR: Grace Cury Hoffmann

ADVISER: Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira

CO-ADVISER: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

ABSTRACT

Energy is essential for the social and economic development of a country. World energy demand cannot only be supplied from fossil sources. It requires efficient biofuels and ensures clean and renewable energy. In this scenario, the use of biomass as a source of energy is determinant, both to reduce the environmental impact and to meet the energy demand. Anaerobic digestion of waste biomass has great potential for energy use. To exploit this potential efficiently, the conditions of biodigestion must remain close to the ideal conditions for the action of microorganisms, and the use of swine manure is an economically viable option. The objective of this work was to optimize the operational procedures for biogas production in covered pond biodigesters fed with swine manure substrate. This is the main type of biodigester used in the southwest region of Goiás, where the city of Rio Verde is located, according to the country in number of confined pigs. For this, a diagnosis of the operation and monitoring of the digesters fed with swine manure substrate was performed and the swine management techniques were identified. Bioreactor bench scale tests were performed to solve the identified limiting factors. A practical manual with operational procedures for the optimization of these biodigesters is being prepared. The results and analyzes obtained in farms of the region showed that the microorganisms are underfed, with substrate dry matter (MS) content of 3.93% and 3.35% MSO, and the digestible MSO content is much lower than the literature determines: 4% -7% MSO, with average value found at 0.97%. The FOS / TAC index identified was between 0.2 and 0.1, below the minimum of 0.2. But the quality of the gas produced is high, with an average methane content of 69.9%. Benchtop reactor testing has shown that codigestion is efficient for increasing nutrient availability as biogas production increased by 50 to 80% in the I2DSVB, I1DSB, and I2DSVT bioreactors, and the best MSO biogas production results were found. For the I3DSBPH and I3DSTPH bioreactors where the use of addition of other inoculum for biota renewal was combined, the use of codigestion and vinasse addition for non-alkalinization of the medium, proving to be an efficient resource, since the pH at the end of the test was below 7.9 and ammoniacal nitrogen concentration was 439 and 422 mg.L⁻¹, below the inhibition range, almost eight times lower than the values found at the end of the test with the I1DS and I1DSB reactors, resulting in 200% higher biogas production than the I1DS reactor. The gas quality produced in the I1DSPH, I3DSBPH and I3DSTPH reactors is high, with an average methane content above 70%. However, concentrations of copper and zinc above the inhibitory range for methanogenic archaea were found, with copper content between 1,071 and 1,970 mg.kg⁻¹ MS and zinc between 719 and 1,302 mg.kg⁻¹ MS.

KEYWORDS: BIOMETHANE, ANAEROBIC DIGESTION, PIG FARMING, ANAEROBIC REACTOR, RENEWABLE ENERGY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira	5
Figura 2 - Variação das fontes de geração de energia elétrica no País entre 2016 e 2017 em GWh	6
Figura 3 - Esquema da decomposição anaeróbia	14
Figura 4 - Biodigestor Indiano	19
Figura 5 - Biodigestor Chinês	19
Figura 6 - Esquema representativo do modelo de biodigestor de lagoa coberta	20
Figura 7 - Biodigestor em operação instalado em propriedade no Estado de Goiás, Região de Rio Verde.....	30
Figura 8 - Instrumentos usados para a análise do teor de MS	31
Figura 9 - Forno Mufla	32
Figura 10 - pHmetro	33
Figura 11 – (a) Forno de micro-ondas e (b) espectrômetro de absorção atômica	35
Figura 12 – (a) Cromatógrafo gasoso e (b) bag acoplado para análise	36
Figura 13 - Representação gráfica do biorreator de 1,3L.....	38
Figura 14 - Preparação do bagaço de laranja.....	39
Figura 15 - Preparação da carcaça.....	40
Figura 16 - Reatores de bancada 1,3L.....	40
Figura 17 - Medidor volumétrico de biogás Ritter	43
Figura 18 - Grupo gerador a biogás.....	47
Figura 19 - Diagrama das instalações da Granja Agropecuária	48
Figura 20 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 1	58
Figura 21 - Geração de biogás por reator - teste 1	60
Figura 22 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 2	63
Figura 23 - Geração de biogás por reator - teste 2	64
Figura 24 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 3	67
Figura 25 - Geração de biogás por reator - teste 3	72
Figura 26 - Geração de biogás dos biorreatores com pH final	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desempenho e exigências de lisina digestível (Lis. Dig.) e de Energia Metabolizável (EM) de suínos fêmeas de alto potencial genético de desempenho médio-superior.....	9
Tabela 2 - Níveis de Suplementação de Microminerais de Fontes Inorgânicas e Orgânicas para Suínos em Crescimento	11
Tabela 3 - Inibidores e suas concentrações tóxicas em processos de digestão anaeróbia	24
Tabela 4 - Proporção de SOV por biomassa nos reatores de bancada - teste 2.....	41
Tabela 5 - Proporção de SOV por biomassa nos reatores de bancada – teste 3	43
Tabela 6 - Porcentagem de matéria seca e umidade na entrada (substrato) e saída (digestato) dos biodigestores da Granja Agropecuária.....	49
Tabela 7 - Avaliação dos índices de FOS/TAC de acordo com a experiência empírica	50
Tabela 8 - Valores de pH e FOS/TAC na entrada e saída dos biodigestores da Granja Agropecuária	50
Tabela 9 - Concentração de Zn e Cu na entrada (substrato) e saída (digestato) dos biodigestores da Granja Agropecuária.....	51
Tabela 10 - Média dos componentes da mistura de biogás por granja.....	52
Tabela 11 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 1	55
Tabela 12 - Composição dos reatores - teste 1	56
Tabela 13 - Quantidade de nitrogênio amoniacal e total nas amostras antes e após o teste 1	56
Tabela 14 - Caracterização final dos reatores - teste 1	59
Tabela 15 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 2.....	61
Tabela 16 - Composição dos reatores - teste 2	62
Tabela 17 - Caracterização final dos reatores - teste 2	64
Tabela 18 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 3	66
Tabela 19 - Composição dos reatores - teste 3	67
Tabela 20 - Concentração de nitrogênio amoniacal e total – teste 3	68
Tabela 21 - Caracterização final dos reatores - teste 3	68
Tabela 22 - Concentração de Zn, Fe e Cu por reator – teste 3	69
Tabela 23 - Concentração de nutrientes – teste 3	69
Tabela 24 - Média dos componentes da mistura de biogás por reator – teste 3	72
Tabela 25 – Valores referência para cálculo do potencial de biogás da região Sudoeste do Estado de Goiás	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Atm - atmosfera

CG - cromatógrafo gasoso

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FID - detector por ionização de chama

FOS/TAC - ácidos orgânicos voláteis / carbono inorgânico

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INO1 - reator com inóculo suíno

I1DS - reator com inóculo suíno e dejetos suíno

I1DS - reator com inóculo suíno, dejetos suíno e codigestão com bagaço de laranja

I1CAR - reator com inóculo suíno com carcaça de suíno

INO2 - reator com inóculo suíno e inóculo Heinz

I2DS - reator com inóculo suíno, inóculo Heinz e dejetos suíno

I2DSVT - reator com inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e uma mistura de vinhaça e torta de filtro para codigestão

I1DSVT - reator com inóculo suíno, dejetos suíno e uma mistura de vinhaça e torta de filtro para codigestão

I2DSVB - reator com inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e uma mistura de vinhaça e bagaço de laranja

I1DSVB - reator com inóculo suíno, dejetos suíno e uma mistura de vinhaça e bagaço de laranja

INO3 - reator com inóculo suíno e inóculo Heinz, aditivado com vinhaça

I1DSPH - reator com inóculo suíno e dejetos suíno, aditivado com vinhaça

I3DSTPH - reator com inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e torta de filtro para codigestão, aditivado com vinhaça

I3DSBPH - reator com inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e bagaço de laranja, aditivado com vinhaça

MS - matéria seca

MSI - matéria seca inorgânica

MSO - matéria seca orgânica

pH - potencial hidrogeniônico

SI – sólidos inorgânicos

SOV - sólidos orgânicos voláteis

ST – sólidos totais

STP - condições normais de temperatura e pressão

TCD – detector por condutividade térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	OBJETIVO(S) ESPECÍFICO(S).....	4
2	CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	5
2.2	SUINOCULTURA NO BRASIL	7
2.3	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	12
2.3.1	<i>Barreiras e perspectivas do biogás no Brasil.....</i>	<i>15</i>
2.4	BIODIGESTORES E PARÂMETROS DE CONTROLE	17
2.4.1	<i>Temperatura.....</i>	<i>21</i>
2.4.2	<i>Potencial Hidrogeniônico - pH.....</i>	<i>21</i>
2.4.3	<i>Agitação do sistema</i>	<i>21</i>
2.4.4	<i>Concentração de nutrientes</i>	<i>22</i>
2.4.5	<i>Agentes inibidores.....</i>	<i>23</i>
2.4.6	<i>Inóculo.....</i>	<i>25</i>
2.4.7	<i>Codigestão.....</i>	<i>25</i>
3	CAPÍTULO II – DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	29
3.1	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1.1	<i>Diagnóstico e levantamento ambiental da suinocultura em Goiás.....</i>	<i>29</i>
3.1.2	<i>Determinação do teor de umidade, matéria seca, matéria seca orgânica e inorgânica.....</i>	<i>30</i>
3.1.3	<i>Determinação da relação de ácidos orgânicos voláteis por carbono inorgânico (FOS/TAC) e do pH</i>	<i>32</i>
3.1.4	<i>Determinação dos teores de zinco (Zn) e cobre (Cu)</i>	<i>34</i>
3.1.5	<i>Determinação de nitrogênio amoniacal e total.....</i>	<i>35</i>
3.1.6	<i>Caracterização do biogás</i>	<i>35</i>
3.1.7	<i>Eficiência de filtros para ácido sulfídrico.....</i>	<i>36</i>
3.1.8	<i>Determinação de potencial de biometano e codigestão.....</i>	<i>37</i>
3.1.9	<i>Elaboração de manual prático.....</i>	<i>45</i>
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.2.1	<i>Levantamento da prática de suinocultura no Estado de Goiás</i>	<i>46</i>
3.2.2	<i>Análise de biodigestores em operação na Região de Rio Verde - Goiás.....</i>	<i>47</i>
3.2.3	<i>Potencial de produção de biometano e codigestão.....</i>	<i>53</i>
4	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos fatores determinantes para o desenvolvimento social e econômico de uma região ou país. Questões econômicas como a escassez de combustíveis e o aumento crescente nos preços sinalizam que a demanda energética mundial não poderá ser suprida apenas por fontes de origem fóssil (ALBUQUERQUE e ARAUJO, 2016).

O processo de industrialização, nas décadas de 1930 e 1940, trouxe para o Brasil e para o mundo um período de grande desenvolvimento da automação, graças, primeiramente, ao aumento da capacidade de fornecimento de energia, sem a preocupação com sua origem ou impactos. Porém, uma mudança de mentalidade vem sendo observada com o passar dos anos. É possível notar uma atenção cada vez maior à necessidade de um crescimento sustentável, que permita a utilização dos recursos naturais sem comprometer o meio ambiente e as futuras gerações.

Um levantamento realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, indica que a produção econômica está intimamente ligada à demanda por energia de um país (EPE, 2011). Assim sendo, é importante a substituição das fontes da matriz energética a fim de se atender às demandas da economia nacional. Contudo, considerando a grande extensão territorial do Brasil, há uma dificuldade na implantação de redes de transmissão elétrica, tornando-se necessária uma maior conscientização sobre os impactos ambientais originados pelas grandes indústrias, no que toca à produção mais convencional (GEORGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013).

As tecnologias à base de fontes renováveis são atrativas devido às vantagens ambientais, além dos benefícios econômicos e sociais. Essas fontes influenciarão na participação da matriz energética nacional na medida em que as tecnologias de conversão e uso se tornarem disponíveis e forem comparativamente preferidas pelos provedores de serviços de energia e consumidores (PEREIRA et al., 2015).

Neste cenário, o uso de biomassa gerada durante os processos produtivos, inclusive nas zonas rurais, com fins de reduzir o impacto ambiental e suprir a demanda energética, pode ser determinante, uma vez que estrategicamente soluciona os problemas relacionados à destinação adequada dos resíduos agroindustriais e gera valor. Inúmeros processos têm sido usados na produção de energia a partir de biomassa residual, destacando-se a gaseificação, a pirólise e a biodigestão.

Segundo Pereira (2013), a digestão anaeróbia vem se destacando na eficiência do tratamento de resíduos, uma vez que proporciona a redução da poluição e a valorização dos subprodutos gerados. Além disso, pode ser considerada um método eficiente no tratamento dos dejetos de animais, pois estabiliza a matéria orgânica, reduz o número de microrganismos patogênicos,

melhora as propriedades da mistura dos dejetos para uso como fertilizantes, além de produzir o biogás, que é a fonte de energia alternativa.

Resende et al. (2015) ressaltam que essa crescente busca por novas fontes alternativas para produção de energia e reciclagem de resíduos aponta para a utilização dos dejetos como opção economicamente viável dada a relevância da atividade agropecuária no Brasil. Adicionalmente, a FNR (2010) relata que o esterco líquido se adequa muito bem para o uso em usinas de biogás em função da sua facilidade de bombeamento e armazenamento em tanques.

Neste sentido, o uso da biomassa em propriedades rurais ganha cada vez mais atenção. Em 2017, o total de energia gerada através da biomassa foi de 8,2% da matriz energética brasileira, sendo que em 2016 houve um crescimento de 3,9% em relação ao ano anterior (EPE e MME, 2018).

A digestão anaeróbia da biomassa proveniente de dejetos suíno possui grande potencial para aproveitamento energético. Para que todo esse potencial seja explorado com máxima eficiência, as condições do meio em que a fermentação anaeróbia acontece devem permanecer em uma faixa próxima das condições ideais para ação dos microrganismos, especialmente as arqueas metanogênicas, que são o elo mais fraco da biocenose e os mais sensíveis a possíveis distúrbios. A operação da usina de biogás é fator determinante para se manter as condições do meio que influenciam a composição e atividade da biocenose microbiana e, com isso, têm influência direta nos produtos metabólicos originados que determinam a qualidade e produtividade do biogás.

O biogás tem inúmeras aplicações, podendo ser usado como fonte de energia para aquecimento e movimentação mecânica nas instalações rurais, diminuindo os custos na propriedade. Desta forma, a inclusão da agroenergia nas propriedades rurais no Brasil torna-se viável com o desenvolvimento de tecnologias de saneamento ambiental pelo tratamento da biomassa residual em biodigestores, gerando sustentabilidade para o modelo atual (FERNANDES, 2012).

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor a otimização de procedimentos operacionais para produção de biogás em biodigestores de lagoa coberta, alimentados com substrato proveniente de dejetos de suinocultura.

1.2 OBJETIVO(S) ESPECÍFICO(S)

- Gerar conhecimento sobre práticas de operação de usinas de biogás e indicar as adequações necessárias a serem feitas no sistema visando o sucesso em projetos de biogás, fornecendo respostas embasadas na prática sobre a geração de biogás;
- Produzir um manual ou cartilha com procedimentos operacionais para otimização de biodigestores do tipo lagoa coberta, os quais são os mais utilizados no Brasil;
- Avaliar a viabilidade de aplicação da codigestão e de adição de outro inóculo e indicar uma proporção a ser utilizada;
- Realizar um estudo ambiental do processo de manejo de suínos no Estado de Goiás, identificar inibidores e avaliar a interferência na produção do biogás;
- Avaliar a eficiência de filtros para remoção de ácido sulfídrico no biogás.

2 CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

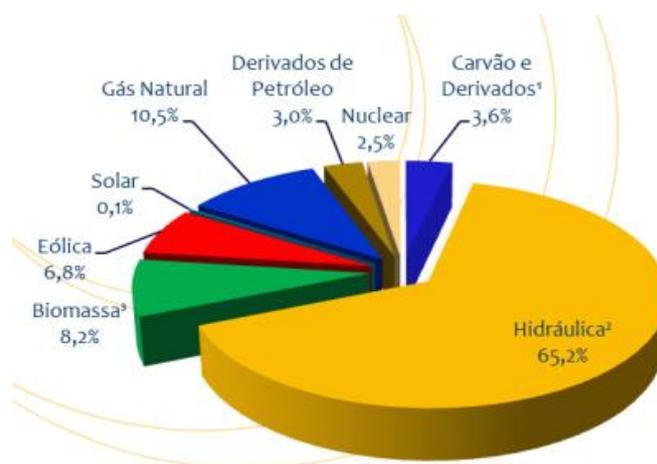
A energia é um insumo fundamental para as atividades humanas utilizada em diferentes territórios e espacialidades geográficas. Em cada país predomina uma matriz energética específica que está diretamente associada com a disponibilidade dos recursos energéticos em seu território. Pode-se destacar que o potencial energético depende dos recursos naturais disponíveis, bem como do conhecimento sobre eles. Desta forma, um país precisa ter acesso a um conjunto de informações para melhor aproveitamento e recuperação dos recursos (RAMPINELLI e ROSA JUNIOR, 2012).

Existe um diverso número de fontes renováveis para produção de energia, podendo estes ser combustíveis ou não. Dentre as diferentes origens tem-se a energia eólica, energia hídrica, energia solar, energia geotérmica, energia das ondas e marés e biomassa (combustão direta, combustíveis gasosos – biogás, álcool combustível – etanol, etc.) (DICORATO, FORTE e TROVATO, 2008).

No Brasil, a produção industrial, o transporte de carga e a mobilidade das pessoas respondem por aproximadamente 65% do consumo de energia e a agropecuária é responsável sozinha por 4% do consumo total. Toda essa demanda é atendida pela produção de energia em todo o País (EPE e MME, 2018).

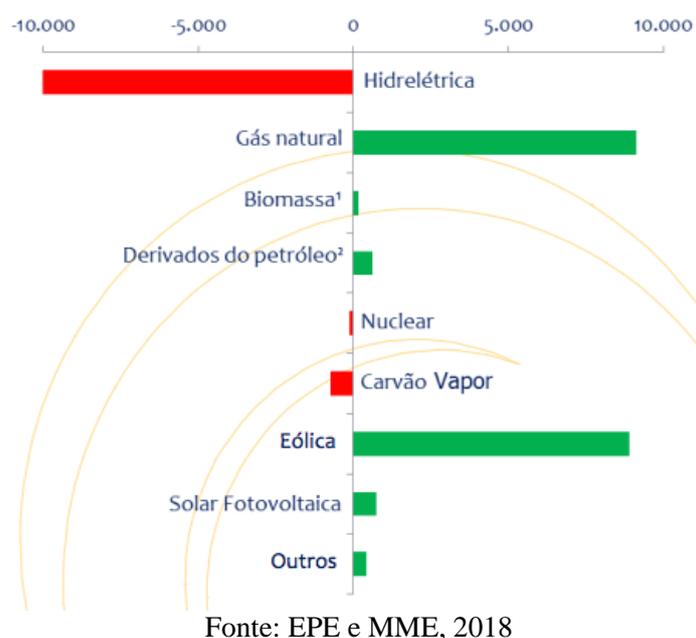
Aproximadamente 65% da matriz de energia elétrica nacional consiste na geração hidráulica, conforme ilustrado na Figura 1. Além disso, em 2017 houve crescimento na produção de energia elétrica por outras fontes renováveis, como de biomassa, eólica e solar fotovoltaica, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE e MME, 2018

Figura 2 - Variação das fontes de geração de energia elétrica no País entre 2016 e 2017 em GWh



Em 2017, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com 43,2% de renováveis. O avanço do gás natural foi compensado principalmente pela produção de energia eólica, biomassas da cana, lixívia e biodiesel. Esse índice foi alcançado embora tenha havido um recuo da participação de renováveis na matriz elétrica em 2017, devido à queda da geração hidráulica (EPE e MME, 2018).

Em 2015, o Brasil assinou compromisso internacional na COP 21 de aumentar para 33% o uso de fontes renováveis na matriz total de energia até 2030 (além da energia hídrica), ampliando a parcela de energias renováveis no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo crescimento da participação de eólica, biomassa e solar (PORTAL BRASIL, 2017).

Dados mais recentes mostram que o País está caminhando para atingir seu objetivo. As fontes renováveis seguem com ampla participação na matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica e na produção verificada no Brasil. Em junho de 2018, elas representaram 81,9% da capacidade instalada de geração de energia elétrica e 87,8% da produção total verificada no País. Em comparação com o mesmo mês do ano anterior, em termos de capacidade instalada, essas fontes cresceram 7.401 MW, sendo 3.450 MW de geração hidráulica, 2.219 MW de eólica, 1.365 MW de fonte solar, 524 MW de biomassa, e com redução das fontes térmicas a combustíveis fósseis. No período de um ano, a geração hidráulica registrou aumento de 3,5% na capacidade instalada, atingindo 102.228 MW. A fonte eólica cresceu 20,7% e responde por 12.931 MW. A biomassa teve elevação de 3,7% e soma 14.657 MW. A solar, apesar do volume total menor, cresceu 577% e alcançou 1.602 MW (MME, 2018).

2.2 SUINOCULTURA NO BRASIL

A carne suína é a fonte de proteína animal mais importante no mundo, representando quase metade do consumo e da produção de carnes, com mais de 94 milhões de toneladas (USDA, 2014). O Brasil é o quarto maior produtor (2,9% do total) e o sexto consumidor em termos absolutos (2,2% do total). Segundo o IBGE (2017), no ano de 2017 o efetivo brasileiro de suínos foi de 41,1 milhões de cabeças, o que representa um aumento de 3,0% em relação a 2016. A Região Sul concentra a maior parte deles, com Santa Catarina no topo do *ranking*, com 19,7% do total nacional. Do efetivo total de suínos, 11,5% correspondem a matrizes, ou seja 4,7 milhões de animais. Sendo que o município goiano de Rio Verde se destaca como o segundo no País com maior contingente de suínos alojados durante o levantamento realizado pelo Instituto.

Contudo, embora a criação de suínos favoreça o desenvolvimento socioeconômico no Brasil, também contribui para a geração de passivos ambientais, com o abundante número de animais e o elevado volume de dejetos produzidos. Quando esses subprodutos gerados não são tratados adequadamente, podem trazer grandes problemas ao meio ambiente e à sociedade, causando contaminação da água e acarretando riscos à saúde humana, já que os dejetos da suinocultura são resíduos com alto poder poluente. Utilizando a equivalência populacional, identifica-se que uma granja com 600 animais possui um poder poluente semelhante ao de um núcleo populacional de aproximadamente 2.100 pessoas. A principal causa da poluição é o descarte direto do esterco de suínos sem o devido tratamento nos cursos de água. Os constituintes desses dejetos que afetam as águas superficiais são matéria orgânica, nutrientes, bactérias fecais e sedimentos. Os nitratos e bactérias são os principais componentes que comprometem a qualidade da água subterrânea (DIESEL; MIRANDA e PERDOMO, 2002).

A composição dos dejetos suínos pode apresentar grandes variações de acordo com o sistema de manejo adotado, fase de crescimento e, principalmente, da quantidade de água e nutrientes em sua composição. O esterco líquido dos suínos contém matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, sódio, magnésio, manganês, ferro, zinco, cobre e outros elementos incluídos nas dietas dos animais (DIESEL, MIRANDA e PERDOMO, 2002).

O volume de dejetos pode ser estimado conforme a fase da produção, embora a quantidade de dejetos também possa variar devido ao manejo e tipo de instalação. Por exemplo, quando se trabalha com lâmina d'água na terminação estima-se um aumento da ordem de 15% na produção de dejetos. O desperdício de água também se apresenta como um fator importante para alterar esses valores (ABCS et al., 2011).

A Tabela 1 demonstra a variação da necessidade nutricional de fêmeas de 21 a 182 dias definida por Rostagno et al. (2017), evidenciando a variação que as características do dejetos

têm devido à variação na ração e no metabolismo do animal nas diferentes fases de crescimento. Os dados consideram energia metabolizável e lisina digestível, que é um aminoácido utilizado como referência nutricional e tem como principal função a síntese de proteína muscular, sendo considerado o nutriente mais importante para deposição de carne magra na carcaça de suínos em crescimento, devido à sua constância na proteína corporal e sua destinação metabólica preferencial para a deposição de tecido muscular (ROCHA et al., 2009; ROSTAGNO et al., 2011).

Nas primeiras semanas do período de engorda, o ganho de peso percentualmente é superior a 30%, enquanto nas últimas semanas antes do abate esse valor fica em aproximadamente 5%. No entanto, em valores absolutos o pico de ganho em massa (kg) é no início da terminação I, atingindo 6,85kg entre 119 e 126 dias. Sendo que a relação da lisina pela energia metabolizável varia durante as semanas, tendendo a diminuir ao longo do processo de engorda.

A Tabela 2 traz os micronutrientes minerais necessários para o crescimento dos animais, sendo importante neste processo a suplementação dos microminerais inorgânicos e orgânicos: cobre, ferro, manganês, selênio e zinco, além do iodo inorgânico, variando a quantidade, em miligramas, ao longo do processo. Portanto, devido à ineficiência total do processo metabólico, comum aos animais, estes nutrientes estarão presentes na composição dos dejetos.

Tabela 1 - Desempenho e exigências de lisina digestível (Lis. Dig.) e de Energia Metabolizável (EM) de suínos fêmeas de alto potencial genético de desempenho médio-superior

Idade Dias	Peso Médio kg	Ganho kg/dia	Exig. Lisina Digestiva g/dia	Exig. Energia Metabolizável kcal/dia	Consumo kg/dia	Relação Lisina/Energia Metabolizável %/Mcal	Lisina Digestí- vel Dieta, %
21	6,44	0,263	4,59	1079	0,317	0,426	1,447
28	8,75	0,331	5,85	1380	0,400	0,430	1,463
35	11,59	0,406	7,29	1754	0,508	0,415	1,433
42	14,44	0,407	7,45	1997	0,579	0,373	1,287
49	17,98	0,506	9,41	2546	0,760	0,370	1,239
56	22,00	0,574	10,89	3050	0,910	0,357	1,197
63	26,48	0,641	12,41	3598	1,074	0,345	1,155
70	31,41	0,704	13,92	4180	1,248	0,333	1,116
77	36,75	0,763	15,40	4783	1,428	0,322	1,079
84	42,46	0,816	16,80	5391	1,609	0,312	1,044
91	48,50	0,862	18,10	5988	1,788	0,302	1,013
98	54,80	0,901	19,26	6558	1,957	0,294	0,984
105	61,32	0,932	20,25	7084	2,115	0,286	0,958
112	68,00	0,955	21,06	7555	2,255	0,279	0,934
119	74,79	0,970	21,68	7960	2,376	0,272	0,912

Idade Dias	Peso Médio Kg	Ganho kg/dia	Exig. Lis. Dig. g/dia	Exig. EM kcal/dia	Consumo kg/dia	Relação Lis/EM %/Mcal	Lis. Dig. Dieta, %
126	81,63	0,977	22,09	8292	2,475	0,266	0,892
133	88,48	0,978	22,30	8550	2,552	0,261	0,874
140	95,28	0,972	22,33	8732	2,606	0,256	0,857
147	102,00	0,960	22,17	8842	2,639	0,251	0,840
154	108,59	0,942	21,86	8886	2,653	0,246	0,824
161	115,04	0,921	21,40	8871	2,648	0,241	0,808
168	121,30	0,895	20,83	8805	2,629	0,237	0,792
175	127,37	0,866	20,16	8698	2,597	0,232	0,776
182	133,21	0,835	19,41	8558	2,555	0,227	0,760

Fonte: Adaptado ROSTAGNO et al., 2017

Tabela 2 - Níveis de Suplementação de Microminerais de Fontes Inorgânicas e Orgânicas para Suínos em Crescimento

Fase	Pré-Inicial I e II		Inicial	Crescimento I e II		Terminação I e II		
Idade (dias)	21 – 32	33 - 42	49 - 70	77 - 91	98 - 112	119 - 140	147 - 175	
Faixa de peso (kg)	5,5 – 9	9 - 15	15 - 30	30 - 50	50 - 70	70 - 100	100 - 125	
Peso Médio (kg)	7,30	10,78	22,5	40	60	85	112,5	
Ganho de Peso (g/dia)	324	368	618	838	954	990	912	
Consumo de Ração (g/dia)	395	501	1036	1729	2378	2967	3257	
Microminerais	mg/kg de ganho			mg/dia				
<i>Inorgânicos</i>								
Cobre	21,0	6,80	7,73	12,98	17,60	20,03	20,79	19,15
Ferro	140	45,4	51,5	86,5	117,3	133,6	138,6	127,7
Manganês	70,0	22,7	25,8	43,3	58,7	66,8	69,3	63,8
Selênio	0,63	0,204	0,232	0,389	0,528	0,601	0,624	0,575
Zinco	190	61,6	69,9	117,4	159,2	181,3	188,1	173,3
Iodo	1,73	0,561	0,637	1,069	1,450	1,650	1,713	1,578
<i>Orgânicos</i>								
Cobre	9,45	3,06	3,48	5,84	7,92	9,02	9,36	8,62
Ferro	63,0	20,4	23,2	38,9	52,8	60,1	62,4	57,5
Manganês	31,5	10,21	11,59	19,47	26,40	30,05	31,19	28,73
Selênio	0,284	0,092	0,104	0,175	0,238	0,270	0,281	0,259
Zinco	85,5	27,70	31,46	52,84	71,65	81,57	84,65	77,98

Uma boa alternativa para minimizar a contaminação potencial pode ser a produção do biogás a partir da utilização desses dejetos. Os resíduos agropecuários produzidos nas propriedades rurais são uma fonte significativa de biomassa para a produção de biogás, o qual contribui para o desenvolvimento sustentável nas zonas rurais e ainda proporciona aos agricultores novas oportunidades de renda (CERVI, ESPERANCINI e BUENO, 2010).

No entanto, o sistema de tratamento utilizado na suinocultura atualmente e exigido pela legislação ambiental brasileira contribui para a emissão de gases de efeito estufa, principalmente o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), pois são sistemas de tratamentos por meio de lagoas de estabilização (anaeróbias e/ou facultativas) abertas, que propiciam um ambiente favorável para a degradação da matéria orgânica dos dejetos, sem controle de emissões (DIESEL, MIRANDA e PERDOMO, 2002).

Saleh (2014) constatou que as granjas de terminação de suíno sem biodigestor tiveram índices de emissão de CH_4 ($\text{mg CH}_4 \text{ ano}^{-1}$) em média 40% maiores que granjas que utilizavam a tecnologia. E em propriedades de produção de leitão esse índice é superior a 75% para as granjas com 1 (um) biodigestor em comparação às com 2 (dois) biodigestores para o tratamento dos dejetos gerados.

Considerando que o total de cabeças de suínos no Estado de Goiás, no ano 2017, foi de 2,05 milhões, - o que representa cerca de 5% do efetivo total do País - sendo que 11,8% são matrizes (IBGE, 2017); somando-se o fato de que na literatura encontram-se alguns índices médios de produção de biogás, baseados em situações experimentais, pode-se calcular aproximadamente a produção de biogás gerado a partir da digestão anaeróbia de dejetos para diversos tipos de animais, incluindo suíno. Segundo a AGEITEC (2017), um suíno de 90 kg produz $0,240 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de biogás, sendo assim estima-se que o Estado de Goiás possui um potencial de produção de cerca de 435.000 m^3 de biogás por dia, considerando todos os animais exceto matrizes. Baseando-se na equivalência de que 1 m^3 de biogás representa energeticamente 1,43 kWh (COLDEBELLA et al., 2008), temos que o Estado possui potencial de gerar 622.050 kWh com biogás a partir de dejetos de suínos.

2.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O uso do biogás pela humanidade remonta ao séc. X a.C., a povos como os assírios e à antiga China, cujo domínio da técnica permitia o seu uso para aquecimento de banhos e outros usos domésticos, tal como o aproveitamento do digerido estabilizado anaerobicamente para a agricultura (HE, 2010).

O Brasil, por possuir condições naturais e geográficas favoráveis à produção de biomassa, pode assumir posição de destaque no cenário mundial na produção e no uso do biogás

como recurso energético. Por sua posição geográfica, o País recebe intensa radiação solar ao longo do ano, o que é fundamental para a produção de biomassa, seja para alimentação ou para fins agroindustriais. Outro aspecto importante advém de o País possuir grande quantidade de terras cultiváveis com solo fértil, sob condições climáticas favoráveis para a agricultura e para a produção animal. No entanto, é necessária a conjugação de esforços para que, essa produção ou o seu incremento, seja feita de maneira sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto social (MMA, 2018).

Fernandes (2012) define biomassa como qualquer material capaz de ser decomposto por ação biológica, sendo um recurso renovável que provém da massa total de matéria orgânica que se acumula em um espaço, pertencendo a ela todas as plantas, animais e resíduos.

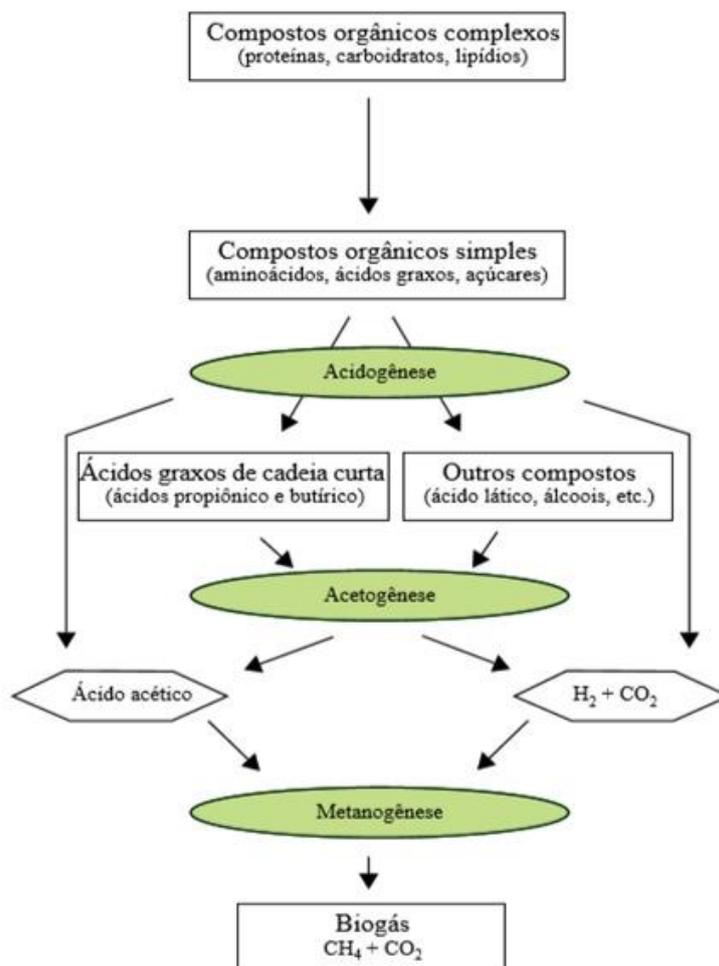
A biomassa, destinada ao aproveitamento energético, é uma fonte primária de energia, não fóssil, que consiste em matéria orgânica de origem animal ou vegetal. A biomassa contém energia armazenada sob a forma de energia química. Em relação à sua origem, as biomassas para fins energéticos podem ser classificadas nas categorias de biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética da agropecuária, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos (EPE e MME, 2017).

A digestão anaeróbia é o processo de degradação da matéria orgânica pela ação de microrganismos na ausência de oxigênio. Este processo produz dois produtos de grande valor: o biogás e um líquido efluente, digestato, utilizado comumente como fertilizante, por conter minerais e nutrientes essenciais para solo e planta na agricultura.

O Ministério das Cidades (2015) conceitua digestão anaeróbia como um ecossistema com diversos grupos de microrganismos (pertencentes aos domínios de bactérias e de archaeas) que trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano (CH_4), dióxido de carbono, água, gás sulfídrico e amônia, recuperando, assim, a energia para o próprio crescimento, formando o lodo anaeróbio.

Conforme ilustrado na Figura 3, o processo de digestão anaeróbia é subdividido em etapas onde compostos orgânicos complexos são transformados em compostos de cadeias menores até a formação do biogás.

Figura 3 - Esquema da decomposição anaeróbia



Fonte: FNR, 2010

Atualmente, o processo de biodigestão anaeróbica a partir de dejetos é a chave para um sistema de produção mais sustentável, devido à redução do uso de energias convencionais, fertilizantes comerciais, além de fornecer um método altamente eficiente para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção (ABBASI, TAUSEEF e ABBASI, 2012). O processo de digestão da biomassa de suíno com a consequente produção de biogás por meio do tratamento adequado dos dejetos pode propiciar o auto-suprimento de energia de propriedades rurais. Sendo que, via de regra, isso ocorre de forma econômica, social e ambientalmente sustentável (SCARPETTA, HOFFMANN e MAYER, 2014).

Os principais componentes do biogás são o gás metano (CH₄) (60% a 80% do biogás) e o gás carbônico (CO₂). Quanto maior o teor de metano, mais puro é o biogás. O gás sulfídrico (H₂S), também formado no processo de fermentação, é responsável pelo odor pútrido do gás e pode ocasionar corrosão nos componentes do sistema de motores geradores de energia elétrica. A proporção dos gases na mistura se modifica de acordo com o manejo aplicado e para cada

tipo de substrato utilizado, pois depende da composição de cada dejetos em relação à sua concentração de compostos e de fatores zootécnicos do animal (BAUNGRATZ et al., 2013).

É extremamente importante em qualquer atividade a verificação da qualidade do produto, neste caso o biogás. Para que o biogás possa ser aproveitado de forma otimizada, o metano gerado deve ser predominantemente equivalente a 70% ou mais do total de gases gerados no processo (MARQUES et al., 2014).

Segundo Oliveira (2009), existem diversas tecnologias capazes de efetuar a conversão energética ou utilização do biogás, onde a energia química contida nas moléculas é convertida em energia mecânica através da combustão e então essa energia mecânica é convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador. As turbinas a gás e os motores de combustão interna, ciclo Otto, são as tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás. No entanto, a mistura gasosa gerada também pode ser aproveitada na produção de calor, o qual pode ser utilizado no aquecimento de caldeiras para qualquer tipo de processo industrial que utilize ou necessite de água a altas temperaturas ou vapor d'água. Além disso, o biogás pode ser aplicado como combustível veicular, sendo para isso necessário realizar a purificação retirando-se tanto o gás carbônico quanto o gás sulfídrico. Também pode-se citar o emprego do biogás como matéria-prima para a indústria, já que o metano pode ser utilizado como matéria-prima para a síntese de uma série de compostos orgânicos, como, por exemplo, na obtenção de metanol.

Além do aproveitamento do biogás como fonte de energia, a utilização dos resíduos sólidos orgânicos como fonte de biogás apresenta grande importância na redução dos impactos ambientais antrópicos, uma vez que contribui para o controle das emissões de metano na atmosfera, já que este possui o potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o gás carbônico (REIS, 2012).

2.3.1 Barreiras e perspectivas do biogás no Brasil

O potencial de produção de biogás do Brasil é comprovadamente elevado e vem sendo estudado e discutido há alguns anos. No Brasil, há algumas plantas de produção e aproveitamento energético do biogás, totalizando 76 MW de potência instalada (ANEEL, 2015). Há também diversas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento, de organização do setor ou mesmo de discussões sobre regulamentação e incentivos do poder público. Apesar disso, observa-se certa dificuldade de crescimento e consolidação dessa fonte de energia no mercado.

Em vários momentos, no Brasil, ocorreram iniciativas para produzir e usar o biogás. Nos anos 1970, o combustível chegou a integrar o modelo da “revolução verde”, entretanto, ao contrário de outras tecnologias, o biogás não prosperou. Reaparecendo após 30 anos, então no

cenário das iniciativas motivadas pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo proposto pelo Protocolo de Quioto, porém em projetos concebidos de forma a simplesmente queimar o gás sem nenhum aproveitamento energético (ABIOGAS, 2015).

A ABiogás (2015) estima o potencial de produção de biogás de maneira conservadora no Brasil em 23 bilhões de $m^3 \cdot ano^{-1}$, sendo 12 bilhões de cana-de-açúcar, 8 bilhões de alimentos e 3 bilhões de resíduos. Esse montante equivale a aproximadamente 12 bilhões de litros de óleo diesel.

Há pelo menos 40 anos são empreendidas iniciativas para desenvolver o uso energético do biogás nacionalmente, seja em ambientes urbanos ou rurais. Há diversas hipóteses que tentam explicar porque essa fonte energética ainda não conseguiu ser aproveitada adequadamente, apesar do grande potencial apontado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Neste sentido, uma pesquisa realizada pela Probiogás (2016) buscou identificar e analisar as barreiras existentes para o desenvolvimento do setor de biogás no Brasil, sendo elas:

- A relação incerta entre o custo do projeto e seu benefício comercial: aponta que apesar das potenciais oportunidades econômicas encontradas no ambiente de negócios brasileiro, a relação entre o custo de projetos de biogás e de biometano e seu benefício comercial muitas vezes não é suficientemente atraente para investidores. A falta ou inadequação de regulamentação para o biogás e seus subprodutos, bem como os preços de comercialização em vigor no mercado, não somente reduzem a oportunidade econômica dos investimentos como retardam o desenvolvimento local de tecnologias e a transferência de conhecimento.
- A reduzida quantidade de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial: faltam empresas e investidores estudando a fundo as oportunidades de projetos de biogás no Brasil e investindo em plantas de biogás com maior aporte tecnológico e de *know how*, sendo que a multiplicação de projetos de referência ainda exige um alto grau de “pioneirismo” entre os empreendedores. A pouca disponibilidade de informações sobre o setor gera mais insegurança com relação aos modelos de negócio aplicáveis à realidade brasileira do que propriamente com relação às tecnologias.
- Dificuldade no acesso a informações técnicas, comerciais e legais: a diversidade de arranjos comerciais possíveis com o biogás inserida em uma diversidade de mercados e culturas de negócios, como é o caso no Brasil, exige grandes esforços para a identificação, projeção e realização do próprio modelo de negócio. Além disso, sob a perspectiva técnica, a maioria dos projetos de alta eficiência desenvolvidos até hoje no Brasil dependeu de conhecimentos que foram importados. A alta necessidade por importação, seja de mão de obra ou de equipamentos, encarece a realização de novos projetos, impactando negativamente a viabilidade financeira de

empreendimentos. Ainda se observa a existência de pouco conhecimento local sobre os enfoques e modelos apropriados de utilização do biogás e falta de fontes independentes e articuladas de informações sobre tecnologias e empresas especializadas.

- Inexistência de políticas específicas relacionadas ao biogás: a importância estratégica do biogás ainda não é reconhecida em toda sua amplitude, visão esta reforçada pela falta de políticas específicas para o tema. Os instrumentos de política, como o marco regulatório, licenciamentos ambientais, linhas de financiamento, incentivos fiscais e tributários e leilões de energia específicos, devem ser adaptados a esta complexidade de forma integrada e estratégica. A complexidade do biogás e as sinergias entre os vários benefícios como geração de energia e tratamento de resíduos e efluentes demandam uma política integrada horizontalmente (inter-setorial) e verticalmente (federal, estadual, municipal). Portanto, o biogás não pode ser visto apenas como uma fonte renovável, mas sua origem representa também um fator crucial para delinear políticas de fomento setoriais e intersetoriais.

Com isso, observa-se que a opção brasileira em geral é pelo emprego de biodigestores de média tecnologia para grandes produtores de resíduos e efluentes orgânicos e biodigestores de baixa tecnologia para conjuntos de pequenos produtores. Sendo que os ganhos de eficiência e confiabilidade dos sistemas de produção de biogás com soluções adaptadas e tropicalizadas são essenciais para a implantação de políticas públicas para a área (ABIOGAS, 2015). Na maioria dos casos, a escolha pela biodigestão é motivada pela busca por menor investimento quando demandado o tratamento dos resíduos ou efluentes (PROBIOGAS, 2016).

Para superar as barreiras identificadas para avanço do setor de biogás no Brasil, a ABIogás (2015) propõe a criação de tarifa diferenciada para geradores a biogás por tempo determinado; a implantação de incentivos fiscais e tributários; a promoção de linhas de financiamento para o biogás e acesso a recursos públicos federais; o fomento ao uso de recursos dos Fundos Setoriais para implantação de projetos referência na área de biogás; o desenvolvimento de uma política setorial estruturante para o biogás; a estruturação de incentivos e subsídios do setor elétrico e de gás natural; o licenciamento e regularização ambiental dos empreendimentos de biogás e o fortalecimento da capacitação e formação na área de biogás, como mecanismos de superação.

2.4 BIODIGESTORES E PARÂMETROS DE CONTROLE

Os biodigestores podem ser definidos como biorreatores que possuem um conjunto de microrganismos que degradam de forma anaeróbia compostos orgânicos presentes no resíduo para produzir metano e dióxido de carbono. Os nutrientes contidos nos dejetos garantem ainda

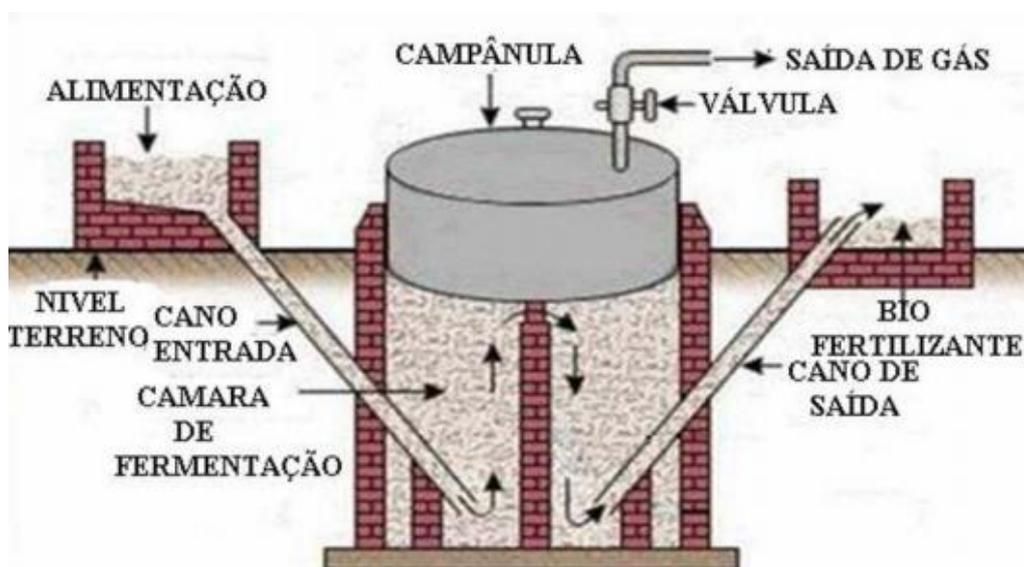
a reprodução dos microrganismos, que também produzirão biofertilizantes, adubo orgânico, além do biogás. A ideia principal de um biodigestor é a criação de um meio anaeróbico favorável que terá duas partes básicas: a câmara de fermentação e o gasômetro. A câmara de fermentação é o local em que os microrganismos realizaram todo o processo de produção de biogás e biofertilizantes, e o gasômetro é o reservatório de biogás (MARQUES et al., 2014).

A escolha de um biodigestor adequado é o principal fator para o desenvolvimento apropriado do processo, devendo haver compatibilidade entre as características da biomassa utilizada e o biodigestor considerado. Diferentes quantidades de resíduos e necessidade de biogás demandam um modelo de biodigestor aderente à sua realidade. A localização do biodigestor também merece atenção: sua escolha deve ser feita de maneira a facilitar a distribuição do biogás pela propriedade, diminuindo os custos com armazenamento e transporte do gás. Instalar o biodigestor atrás do local de manejo é uma opção atraente, de modo que o biogás fabricado pode ser utilizado diretamente no local, demandando menos tubulações e evitando perdas (AGEITEC, 2017).

Existem biodigestores de produção descontínua e contínua. Na produção descontínua, uma carga de dejetos é inserida no biodigestor, que é totalmente fechado, sendo reaberto somente após a produção do biogás, havendo a retirada do biofertilizante e se iniciando um novo ciclo, sendo que este processo leva longos períodos. Na produção contínua, a biomassa é colocada ao mesmo tempo em que seus produtos são retirados, sem que haja necessidade de abertura do equipamento (AGEITEC, 2017).

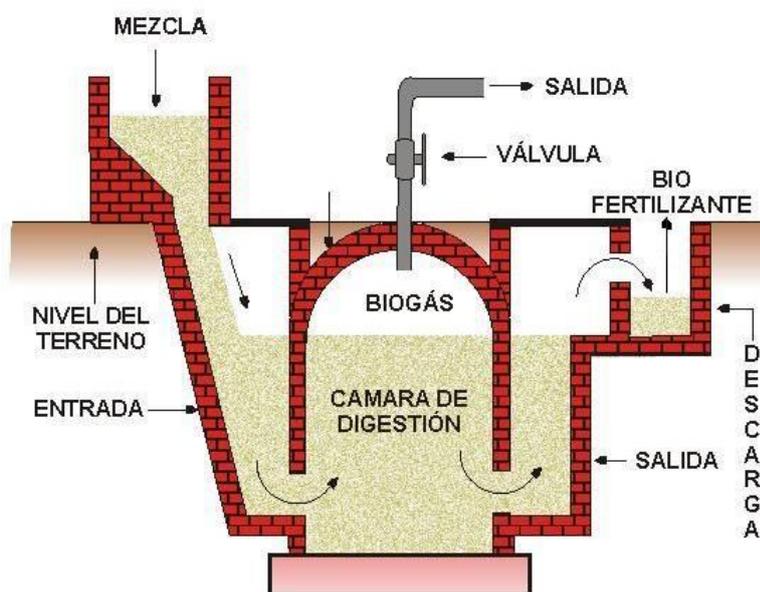
No Brasil, os modelos de biodigestores de sistema contínuo mais observados são: o indiano, o chinês e o de lagoa coberta. O indiano, como representado na Figura 4 - é caracterizado por possuir uma campânula, que é uma espécie de tampa conhecida como gasômetro, a qual pode estar mergulhada na biomassa em fermentação ou pode estar em um selo d'água externo. Sua estrutura é composta de uma parede central que serve para dividir o tanque de fermentação de duas câmaras, para assim permitir que o material possa circular pelo interior da câmara de fermentação (TARRENTO, 2006). Já o biodigestor modelo chinês, conforme Figura 5, é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria onde ocorre a fermentação, e apresenta um teto impermeável e abobadado que é destinado ao armazenamento do biogás. O seu funcionamento é com base no princípio de prensa hidráulica, ocorrendo então aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resultando em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão (JORGE e OMENA, 2012).

Figura 4 - Biodigestor Indiano



Fonte: FONSECA et al., 2009

Figura 5 - Biodigestor Chinês

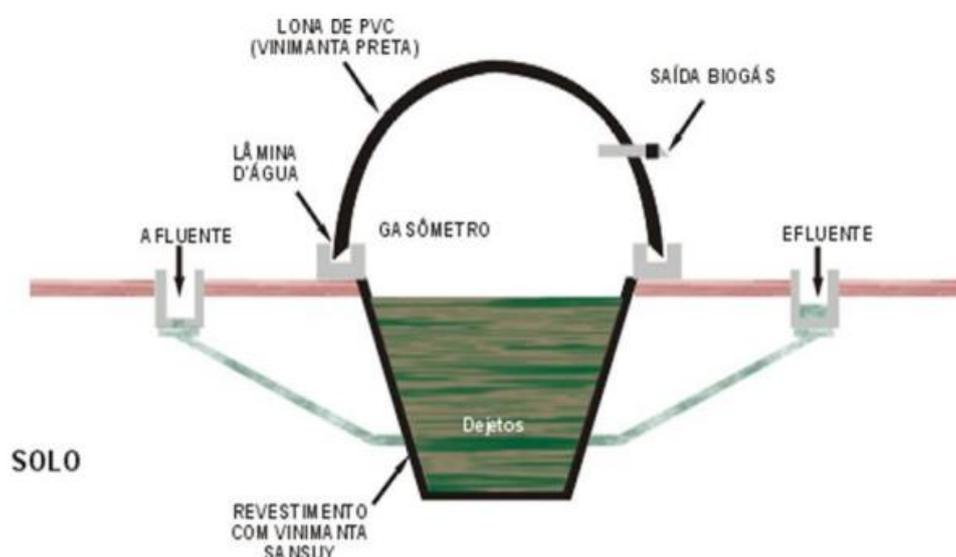


Fonte: FONSECA et al., 2009

O biodigestor de lagoa coberta, também chamado de canadense, da marinha ou tubular com manta plástica, é o mais difundido e aplicado no Brasil, e destaca-se por ser mais moderno e barato, além de apresentar a vantagem de poder ser usado tanto em pequenas quanto em grandes propriedades e também em projetos agroindustriais (OLIVER, 2008; CANAL RURAL, 2012). O modelo se diferencia pelo fato de ser do tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga feita em alvenaria e com largura maior que a profundidade, possuindo, então, uma

maior área de exposição ao sol, possibilitando uma grande produção de biogás e também evitando o entupimento (CASTANHO e HARRUDA, 2008). Esse biodigestor foi desenvolvido pela Marinha Brasileira em 1970 e apresenta uma tecnologia mais moderna, ainda que possua uma construção simples. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na Figura 6. À medida que o biogás é produzido, a cúpula plástica maleável é inflada e o biogás é acumulado, ou pode ser enviado a um gasômetro separado para se obter um maior controle operacional. Pode variar de acordo com as tecnologias agregadas, como agitador, e tecnologias de monitoramento e controle (JUNQUEIRA, 2014).

Figura 6 - Esquema representativo do modelo de biodigestor de lagoa coberta



Fonte: OLIVER et al., 2008

Monitorar e controlar o processo biológico representa um desafio. Em situação normal, o objetivo da decomposição anaeróbia no setor agrícola é atingir uma taxa constante de produção de metano. Parâmetros como carga orgânica volumétrica, tempo de retenção, taxa de degradação máxima e taxa de produção de gás, portanto, são definidos pelo dimensionamento da usina e pelo substrato utilizado. Esses parâmetros têm de ser mantidos tão constantes quanto possível pelo operador da usina.

O estado estacionário, contudo, não pode ser atingido na prática, uma vez que é impossível excluir completamente a possibilidade de falhas, tais como: alterações das propriedades do substrato, paradas de bombas, introdução de desinfetantes no sistema, etc. Essas falhas levam a desvios do estado ideal, que precisam ser detectados a fim de que a causa possa ser identificada e o problema sanado.

O metabolismo dos microrganismos anaeróbios mesofílicos são dependentes de diversos fatores, com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser

considerados e controlados (KUNZ et al., 2019). Os principais fatores de monitoramento e controle que influenciam a digestão anaeróbia estão detalhados a seguir.

2.4.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais parâmetros que influencia não só a atividade enzimática, como também o rendimento do gás metano (LI et al., 2014). No geral, os microrganismos desse processo crescem em duas faixas de temperatura: mesofílica (20°C a 45°C) e termofílica (40°C a 60°C). Na faixa mesofílica, o gasto energético é menor e o processo tende a ser mais estável, apesar disso a produtividade e a taxa de conversão são menores quando comparadas à faixa termofílica (DOBRE et al., 2014; KHALID et al., 2011).

A operação do processo no regime termofílico possui vantagens como maior crescimento das arqueas metanogênicas, eficiência devido a uma rápida biodegradabilidade, redução de agentes patogênicos e melhor separação das fases líquidas e sólidas.

Apesar da formação de metano poder ocorrer em condições extremas, como 0 a 97 °C (CHERNICHARO, 1997), no processo anaeróbio o mais importante é manter uma temperatura constante dentro do reator, devido, principalmente, ao fato de que as arqueas metanogênicas são mais sensíveis a variações bruscas de temperatura (BARRERA, 2003; SOUZA, 1984).

2.4.2 Potencial Hidrogeniônico - pH

As atividades dos microrganismos anaeróbios são sensíveis a variações do pH e as condições ácidas podem comprometer o seu crescimento, em especial as metanogênicas. Em biodigestores, a faixa de operação está entre pH 6,0 a 8,0 (MAZZUCCHI, 1980). No geral, a faixa ótima para obtenção do biogás no processo é de 6,5 a 7,5 (LIU et al., 2008). Contudo, cada etapa vai apresentar um pH ótimo.

Na hidrólise e acidogênese, o ótimo se encontra entre 5,5 e 6,5, na acetogênese entre 6,5 e 8,0 e na metanogênese entre 7,0 e 8,0. As inibições do processo podem ocorrer em pH acima de 8,0, devido à inibição por amônia e outros mecanismos e, principalmente, em pH muito ácido, já que a maioria dos microrganismos têm as suas atividades em meio neutro e um pH muito baixo pode levar à inibição ácida (JAIN et al., 2015).

2.4.3 Agitação do sistema

O processo de agitação pode ser realizado através de agitação mecânica, retorno de gás produzido na forma de pequenas bolhas ou recirculação do lodo. Esse processo proporciona um maior contato entre os microrganismos e a matéria orgânica, evitando a formação das chamadas

zonas mortas, resultado da sedimentação do lodo, podendo causar perda de parte da capacidade útil do reator (BOHRZ, 2010).

A presença de agitação no biodigestor garante melhor contato entre a biomassa ativa e a alimentação; uniformidade física, química e biológica em todo o reator; bem como a dispersão rápida dos produtos metabólicos da digestão e de qualquer substância tóxica que entre no sistema, minimizando assim os efeitos inibidores da atividade microbiana; além de prevenir a formação de espuma e a formação de gradientes de temperatura no interior do reator (VITORATTO, 2004).

2.4.4 Concentração de nutrientes

Cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de vitaminas, micro e macronutrientes, sendo que a taxa de crescimento e a atividade das diversas populações estão condicionadas à concentração e à disponibilidade desses nutrientes. A presença de alguns macroelementos como o carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos é necessária para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas. Sendo assim, é importante o conhecimento da composição química e do tipo de biomassa utilizada.

A quantidade de metano que pode ser obtida do substrato é determinada pelo seu teor de proteínas, gorduras e carboidratos. Esses fatores influenciam igualmente a necessidade específica de nutrientes. A proporção adequada entre macro e micronutrientes é um pré-requisito para a estabilidade do processo. Sendo o carbono e o nitrogênio os nutrientes mais importantes para o processo, é importante que o substrato tenha a relação C/N correta, sendo que o desequilíbrio dessa relação pode ocasionar o colapso de toda a população de microrganismos. Por isso, para que o processo transcorra adequadamente, a relação C/N deve estar na faixa de 10 a 30 (FNR, 2010).

2.4.4.1 Teor de nutrientes no digestato

O solo possui elementos que são essenciais para o crescimento das plantas. Na ausência desses insumos, a planta não completa seu ciclo de vida e com a deficiência apresenta sintomas que limitam seu crescimento. Esses nutrientes são divididos em dois grandes grupos, dependendo da quantidade exigida pelas plantas: macrominerais: N, P, K, Ca, Mg e S; e microminerais: B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn e Co (OLIVER et al., 2008).

Após a digestão anaeróbica no interior do biodigestor, o material se transforma em biofertilizante, que apresenta alta qualidade para uso agrícola. Como a digestão provoca a alteração

principalmente da fração de carbono do substrato, os nutrientes contidos são preservados integralmente, sendo que o processo os torna mais solúveis e, portanto, aumenta a sua fitodisponibilidade (FNR, 2010).

O adubo orgânico é isento de agentes causadores de doenças às plantas e contribui de forma significativa no reestabelecimento do teor de matéria orgânica do solo, funcionando como melhorador de suas propriedades químicas, físicas e biológicas, que tem importante papel na sua estruturação e fixação de nitrogênio atmosférico (OLIVER et al., 2008).

2.4.5 Agentes inibidores

A inibição é a consequência da diminuição de atividade ou até mesmo morte de um microrganismo devido à presença de compostos tóxicos no ambiente. Os casos mais comuns de inibição do processo de digestão anaeróbia são pelo acúmulo de ácidos gordos voláteis e amônia dentro do reator. Outros inibidores menos comuns, como ácido sulfídrico, metais alcalinos e alcalino-terrosos e outros metais tóxicos como, crômio, níquel, zinco e cobre, são apontados na bibliografia como possíveis causadores de instabilidade e falhas de sistemas de tratamento anaeróbio (GONÇALVES, 2012).

Alguns metais são necessários como micronutrientes para os microrganismos, mas esses, a partir de certos limites, podem se tornar tóxicos para os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia, especialmente as arqueas metanogênicas que são mais sensíveis. Praticamente qualquer substância em elevadas concentrações em um substrato pode influenciar negativamente a atividade bacteriana. Isso se aplica principalmente a antibióticos, solventes, desinfetantes, herbicidas, sais e metais tóxicos, substâncias capazes de inibir o processo de digestão mesmo em pequenas quantidades (FNR, 2010). O aporte de antibióticos no processo de suinocultura geralmente se dá pela presença de antibióticos utilizados como promotores de crescimento presentes na ração ou de uso terapêutico e os ministrados diluídos na água dos bebedouros, sendo que o efeito inibidor varia bastante entre as diferentes composições.

Alguns inibidores também interagem com outras substâncias. Os metais tóxicos, por exemplo, são danosos ao processo de digestão somente quando diluídos. Eles são agregados pelo sulfeto de hidrogênio, composto também formado durante o processo de digestão, e precipitados na forma de sulfeto de baixa solubilidade. Como na prática o H_2S quase sempre é formado durante a fermentação metanogênica, a presença dos metais geralmente não perturba o processo. Isso não se aplica a compostos de cobre, que devido às suas propriedades bacteriostáticas são tóxicos mesmo em concentrações mínimas (40 - 50 $mg.L^{-1}$). Em processos agrícolas, esses compostos podem entrar no ciclo produtivo por meio, por exemplo, da desinfecção de patas de animais (FNR, 2010).

A presença de compostos orgânicos tóxicos (pesticidas) pode inviabilizar a operação do sistema, pois, além dos metais em excesso e dos sais que também podem inibir a produção de metano, se a concentração destes for muito elevada, pode levar à inibição total da produção do gás, conforme apresentado na Tabela 3. Por fim, concentrações elevadas de amônia também podem levar à intoxicação do sistema. A forma tóxica da amônia é a amônia livre (NH_3), cuja concentração depende da concentração amoniacal total, pH e temperatura.

Tabela 3 - Inibidores e suas concentrações tóxicas em processos de digestão anaeróbia

Inibidor	Concentração de inibição	Observação
Oxigênio	$> 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$	Inibição das arqueas metanogênicas anaeróbias obrigatórias
Sulfeto de hidrogênio	$> 50 \text{ mg.L}^{-1} \text{ H}_2\text{S}$	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório
Ácidos graxos voláteis	$> 2.000 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HAc}$ (pH = 7,0)	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Nitrogênio amoniacal	$> 3.500 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NH}_4^+$ (pH = 7,0)	Quanto maiores o pH e a temperatura, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias
Metais pesados	Cu $> 50 \text{ mg.L}^{-1}$ Zn $> 150 \text{ mg.L}^{-1}$ Cr $> 100 \text{ mg.L}^{-1}$	Só metais dissolvidos apresentam efeito inibidor. Descontaminação pela precipitação de sulfeto
Desinfetantes antibióticos	N.E	Efeito inibitório varia com o composto

Fonte: FNR, 2010

O processo de limpeza e desinfecção das baias é uma ferramenta importante e corriqueira no programa de biossegurança na suinocultura. Visa reduzir a pressão de infecção - retirada de sujidades e eliminação de agentes causadores de doenças como vírus, bactérias e parasitas - entre lotes. Neste processo são utilizados detergentes, com ação umedecedora, emulsionante e surfactante, e desinfetantes, como: glutaraldeído, fenol, compostos de cloro, ácidos, formaldeído, compostos de amônia quaternária, cresol, peróxido de hidrogênio e compostos de iodo, devido à sua ação, que pode ser viricida, bactericida, fungicida e/ou esporicida. Quando mal gerido, pode ser carregado ao biodigestor e, em determinada concentração, inibir o processo de biodigestão (ABCS et al., 2011).

2.4.6 Inóculo

Além dos parâmetros de controle identificados, deve-se ressaltar a importância da qualidade do inóculo para o processo de biodigestão. Os resultados dos testes de fermentação dependem primeiramente da atividade do lodo (inóculo anaeróbio) utilizado. O inóculo geralmente é coletado em uma planta de biogás, com intuito de fornecer a maior diversidade de microrganismos anaeróbios possíveis (SBERA e EMBRAPA, 2019).

O atraso no início da produção de biogás no tratamento de dejetos de suínos sem adição de inóculos se dá devido à inexistência ou baixa população de microrganismos importantes para o processo, evidenciando a importância do inóculo na partida de reatores anaeróbio e, consequentemente, na eficiência do tratamento de águas residuárias de suinocultura. Assim, a adição de inóculos ricos em um consórcio de microrganismos antecipa e aumenta a produção de biogás (STEIL, 2001; PRETTO, 1985).

2.4.7 Codigestão

Segundo a definição descrita por Angelidaki e Ahring (1997), a codigestão é uma forma de tratamento conjunta para diferentes tipos de resíduos. A codigestão dos dejetos originados com a produção animal e resíduos agroindustriais é uma técnica atual, que segundo MATA-ALVAREZ et al. (2014) vem sendo explorada intensamente devido às características individuais destes resíduos e à melhoria que ocorre. A principal vantagem da codigestão consiste em misturar substratos que favorecem as interações positivas, ou seja, o equilíbrio de macro e micronutrientes, o equilíbrio de umidade e/ou diluição de compostos inibidores ou tóxicos e/ou o aumento na quantidade de matéria orgânica, o que alavanca a produção de metano, aumentando a viabilidade econômica de plantas de produção de biogás.

Os benefícios atribuídos codigestão incluem aumento da carga de matéria orgânica facilmente biodegradável, diluição de substâncias tóxicas, melhoria da capacidade tampão da mistura, maior rendimento de biogás, melhor qualidade do produto digerido e custos reduzidos. Rendimentos ótimos de produção de metano demonstram as vantagens do dejetos suíno quando digeridos com substratos complementares (BOROWSKI, DOMAŃSKI e WEATHERLEY, 2014).

Para Abaldea et al. (2016) o sucesso da codigestão consiste na seleção de substratos que preencham as deficiências do substrato escolhido. Desta forma, a seguir se encontram as características dos cosubstratos utilizados neste estudo.

2.4.7.1 Bagaço de laranja

O Brasil é responsável por 60% da produção mundial de suco de laranja e também o campeão de exportação do produto, sendo que 80% da produção de laranja no País resultam em sucos industrializados (MAPA, 2019). A citricultura goiana se destaca no cenário nacional com quase 13 mil hectares e uma produção de quase 226 mil toneladas de frutas, ocupando a 7ª colocação no *ranking* nacional (SANTOS, 2019).

A indústria de suco de laranja gera, como subproduto, o bagaço de laranja, que compreende aproximadamente 50% do total da fruta. Após a extração do suco e prensagens a úmido, obtém-se o resíduo, chamado de bagaço (TEIXEIRA, 2001).

O bagaço de laranja possui particularidades na composição que devem ser consideradas no processo de digestão anaeróbia, tais como o pH ácido e o alto conteúdo de material lignocelulósico. A literatura aponta pH ácido, variando na faixa de 3,0 a 4,0 e a superfície das cascas do bagaço contém um óleo essencial (D-limoneno), que é de degradação rápida nos processos biológicos (SANTOS et al., 2018; MARTIN et al., 2010; SILES et al., 2016).

A lignocelulose consiste em três componentes orgânicos principais: celulose, hemicelulose e lignina. A hemicelulose forma uma ligação entre moléculas de lignina e celulose, aumentando assim a compacidade de toda a rede de celulose-hemicelulose-lignina (LAUREANO-PEREZ et al., 2005; IQBAL et al., 2011).

Resíduos celulósicos tem grande potencial para a produção de biocombustíveis. Ladisch et al. (2010) relatam que características da lignina como composição e estrutura podem afetar positivamente o processo de hidrólise e aumentar assim a eficiência da produção de biogás, embora Grabber (2005) relate que um alto teor de lignina na biomassa leve a uma menor eficiência de degradação.

O principal destino do resíduo de bagaço de laranja atualmente é o uso como complemento para ração animal, após secagem e peletização. Algumas limitações fazem com que este resíduo tenha uma utilização restrita, entre elas a grande quantidade de água existente no bagaço. Devido ao elevado custo de desidratação e armazenamento, há interesse das empresas em desenvolver mercados para o bagaço cítrico úmido (ALEXANDRINO, 2007).

2.4.7.2 Torta de filtro

O Estado de Goiás é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil e há estimativa de crescimento de 7,5% na produção para o ano de 2019, podendo chegar a 70 milhões de toneladas (FAEG, 2018).

As usinas de cana-de-açúcar geram subprodutos, como o bagaço, a torta de filtro e o melaço. A torta de filtro é um importante resíduo da indústria sucroalcooleira, constituída pela lama proveniente da clarificação do caldo de cana, derivado da filtração do líquido extraído das moendas no filtro rotativo. A concentração da torta de filtro é constituída de cerca de 1,2 a 1,8% de fósforo e cerca de 70% de umidade. Apresenta também alto teor de cálcio e consideráveis quantidades de micronutrientes. A torta de filtro é produzida na ordem de 2,5 a 3,5% de cana moída e apresenta elevada umidade, relação C/N, teor de matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio e nitrogênio (ROSSETTO e SANTIAGO, 2019)

A torta de filtro, embora utilizada na recuperação de solos com baixa fertilidade devido à sua alta concentração de fósforo e matéria orgânica, ainda faltam informações sobre modos de aplicação (SIQUEIRA, 2010; SANTOS, 2009). A elaboração da compostagem da torta de filtro adicionando gesso, cinzas de caldeira e palhada tem agregado valor à torta de filtro, melhorando sua concentração em nutrientes e reduzindo sua umidade, o que é vantajoso para o transporte a distâncias maiores e desvantajoso para plantios em épocas de estiagem. A torta é empregada principalmente em cana-planta, substituindo parcial ou totalmente a adubação fosfatada, dependendo da dose recomendada.

2.4.7.3 Vinhaça

O processo de fabricação de etanol gera grandes volumes de efluentes, principalmente a vinhaça, que também pode ser chamada de caldo, tiborna, restilo, garapão ou vinhoto (MACHADO e FREIRE, 2009). A quantidade do subproduto formado na destilação do etanol é considerada grande, pois para cada litro de álcool produzido, de 10 a 14 litros de vinhaça são criados. Por ser um efluente com baixo pH, alta temperatura (85 a 90°C), coloração marrom escura, alto teor de cinzas e alta porcentagem de matéria orgânica e inorgânica dissolvida, o tratamento da vinhaça é um dos problemas mais significativos e desafiantes para o processo de produção industrial (SHEEHAN e GREENFIELD, 1979; WILKIE et al., 2000, PANT e ADHOLEYA, 2007).

Segundo Rodrigues et al. (2012), a vinhaça é composta de sólidos orgânicos e minerais provenientes do vinho da destilação e possui também resíduos de açúcares, álcool e compostos voláteis. Ela é rica em nutrientes como potássio, fósforo, cálcio, amônia, alumínio, cloreto, ferro, magnésio, manganês e enxofre e possui elevado conteúdo de matéria orgânica, com valor de DQO entre 25 à 60 g.L⁻¹, baixo pH (variando de 3,7 a 5,0) e temperatura elevada na saída dos destiladores (MACHADO e FREIRE, 2009; SZYMANSKI, BALBINOT e SCHIRMER, 2010).

No Brasil, a maneira mais comum de descarte da vinhaça é a incorporação ao solo agrícola, utilizando a técnica de fertirrigação. O descarte da vinhaça no solo, uma forma barata de dispor do resíduo, é justificado pelo fato dela ser rica em diversos nutrientes e minerais essenciais para o crescimento de plantas (SANTOS et al., 2013; LAIME et al., 2011). Porém, a fertirrigação da vinhaça *in natura* pode mudar as características do solo, promovendo mudanças em suas propriedades químicas e físicas. Este processo provoca o aumento da salinidade do solo, principalmente devido ao alto nível de potássio da vinhaça, um aumento da disponibilidade de alguns nutrientes para as plantas e um aumento da quantidade de íons, favorecendo a contaminação de águas subterrâneas. Estas questões mostram a necessidade de se desenvolver usos mais racionais para este tipo de resíduo da produção de etanol (SANTOS et al., 2013).

3 CAPÍTULO II – DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Diagnóstico e levantamento ambiental da suinocultura em Goiás

A primeira etapa da pesquisa consistiu em um diagnóstico de quais tipos de biodigestores alimentados com substrato de dejetos suíno existem no Estado de Goiás, como eles são operados e monitorados, quais métodos de manejo dos animais são utilizados e como influenciam na geração e características dos dejetos, além de identificar como é o regime de abastecimento dos reatores, volume de água e como se dá a aplicação de antibióticos, agentes biocidas e imunizantes utilizados no manejo durante vacinação, aplicação direta, higienização do ambiente, entre outros, e se esses agentes estão sendo carreados ao biodigestor.

Para o levantamento ambiental e diagnóstico da produção de suíno no Estado, foram realizadas visitas a granjas de criação e entrevistas com proprietários e trabalhadores do setor, entrevistas e reuniões com especialistas e pesquisadores da área, integrantes de programas de mestrado do Campus Rio Verde - IF Goiano, da Associação dos Granjeiros e Integrados em Terminação da BRF (Aginterp) Unidade Rio Verde, e também com empreendedores que atuam no setor comercializando biodigestores e soluções na área de biogás.

Posteriormente, foram selecionadas granjas de criação de suíno para realização de análises e avaliação de fatores que poderiam influenciar negativamente a produção de biogás durante a operação do reator. Simultaneamente, foi realizado um estudo amplo da literatura para identificar quais os principais fatores que podem inibir o processo de geração do gás, reduzindo sua produtividade e/ou sua qualidade – dada principalmente pelo teor de metano na mistura. Desta forma, foi utilizado como referência o Guia Prático do Biogás – geração e utilização (FNR, 2010) e artigos científicos, de onde foram levantados os fatores que influenciam na digestão anaeróbia, como: concentração de oxigênio, temperatura, valor do pH, disponibilidade de nutrientes e presença de substâncias inibidoras.

Para esta análise foram realizadas avaliações *in loco* de forma a confrontar as práticas utilizadas nas granjas com resultados das análises laboratoriais do substrato, digestato e biogás, para identificar se de fato existem fatores inibindo a geração da mistura gasosa. A Figura 7 ilustra um biodigestor em operação em uma propriedade localizada no Sudoeste goiano, selecionada devido a possuir a infraestrutura necessária para a pesquisa, abertura por parte do proprietário para realização das coletas e levantamentos, além de seguir o padrão de manejo dos animais da região.

Nesta, foram coletadas amostras na entrada (substrato) e saída (digestato) de biodigestores em funcionamento em uma granja para realização de ensaios de caracterização físico-

químicos das biomassas residuárias, sendo eles: teor de umidade, teor de matéria seca (MS), teor de matéria seca orgânica (MSO), teor de matéria seca inorgânica (MSI), pH, relação de ácidos orgânicos voláteis e carbono inorgânico (FOS/TAC), nitrogênio amoniacal e total, teor de zinco (Zn) e cobre (Cu).

Figura 7 - Biodigestor em operação instalado em propriedade no Estado de Goiás, Região de Rio Verde



Fonte: Autor, 2018

3.1.2 Determinação do teor de umidade, matéria seca, matéria seca orgânica e inorgânica

As amostras foram coletadas em recipiente plástico tampado e conservadas sob refrigeração até o momento da análise, conforme VDI 4630. Todas as análises desta série de sólidos foram realizadas em triplicata.

O principal objetivo dessa análise foi determinar a fração biodegradável da mistura, que é a matéria orgânica, pois é ela que possui potencial de se transformar em metano. Para isso, o primeiro passo foi a determinação do teor de umidade e teor de matéria seca. Desta forma, as amostras foram colocadas em cadinhos e pesadas em balança analítica de precisão digital e então levadas à estufa a 105 °C por cerca de 24 horas ou até atingir peso constante. Após esse processo, as amostras foram esfriadas no dessecador até a temperatura ambiente para serem pesadas, conforme Figura 8.

Figura 8 - Instrumentos usados para a análise do teor de MS
(a) Estufa; (b) Dessecador com cadinhos; (c) Balança analítica



Fonte: Autor, 2018

Com os valores das massas foi possível determinar o teor de umidade e MS, conforme Equações 1 e 2.

$$MS = \frac{m_{amostra} - (m_{inicial} - m_{final})}{m_{amostra}} \quad \text{Eq. 1}$$

$$U = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{amostra}} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

MS = teor de matéria seca (g_{MS}/g_{Amostra})

m = massa (g)

m_{inicial} = massa da amostra + massa do cadinho (g)

m_{final} = massa da amostra após a secagem + massa do cadinho (g)

U = umidade (%)

Os teores de MSO e MSI foram determinados a partir da calcinação das amostras, que após previamente secas na etapa de quantificação da MS foram calcinados em chama e levadas à mufla, à temperatura de 550°C por período de 3 horas - A Figura 9 ilustra o equipamento utilizado para esta análise. Nesta etapa foram calcinadas as substâncias voláteis presentes.

Figura 9 - Forno Mufla

Fonte: Autor, 2018

Após a calcinação, os recipientes com as amostras foram esfriados parcialmente dentro da mufla desligada e em seguida colocados no dessecador para terminar o processo de resfriamento à temperatura ambiente e, finalmente, pesados. O teor de MSI foi obtido segundo a Equação 3.

$$MSI = \frac{m_{final} - m_{cadinho}}{m_{amostra}} \quad \text{Eq. 3}$$

Já o teor de MSO foi obtido pela diferença entre os teores MS e MSI, conforme Equação 4:

$$MSO = MS - MSI \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

m_{final} = massa calcinada + massa do cadinho (g)

$m_{cadinho}$ = massa do cadinho (g)

$m_{amostra}$ = massa da amostra (g)

MSI = teor de matéria seca inorgânica ($g_{MSI}/g_{Amostra}$)

MSO = teor de matéria seca orgânica ($g_{MSO}/g_{Amostra}$)

MS = teor de matéria seca ($g_{MS}/g_{Amostra}$)

Os valores obtidos foram analisados a partir dos valores de referência definidos pela FNR (2010).

3.1.3 Determinação da relação de ácidos orgânicos voláteis por carbono inorgânico (FOS/TAC) e do pH

A relação FOS/TAC foi obtida por titulação. Sendo que o TAC (carbono inorgânico total) é o consumo de ácido sulfúrico a $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$ na titulação da amostra até se alcançar o

pH 5,0. Ao prosseguir a titulação até o pH 4,4, é possível calcular a partir do consumo do ácido o FOS (ácidos orgânicos voláteis). As fórmulas para realizar estes cálculos são a Equação 5 e 6 que foram determinadas empiricamente (RIEGER e WEILAND, 2016; FNR, 2010). Para essa etapa, todas as análises foram realizadas em triplicata.

Para determinação do FOS/TAC, as amostras inicialmente foram centrifugadas até a separação completa entre fase sólida e líquida, então 20 mL da fase líquida centrifugada foram transferidos para um frasco erlenmeyer, onde foi determinado o pH da amostra com uso do pHmetro digital calibrado (Digimed, DM 20) - Figura 10.

Figura 10 - pHmetro



Fonte: Autor, 2018

Para obtenção de TAC iniciou-se a titulação da amostra com ácido sulfúrico, concentração de $0,05 \text{ mol.L}^{-1}$, até atingir a faixa de pH 5,0. Posteriormente, o valor foi calculado através da Equação 5, de acordo com a FNR (2010).

$$TAC = Vol_{\text{ácidoconsumidoTAC}} \times 250 \quad \text{Eq. 5}$$

Então, para obtenção de FOS deu-se prosseguimento à titulação com ácido sulfúrico até atingir o pH 4,4. Então foi calculado o valor de FOS, conforme Equação 6.

$$FOS = (Vol_{\text{ácidoconsumidoFOS}} \times 1,66 - 0,15) \times 500 \quad \text{Eq. 6}$$

Após obtenção dos resultados das Equações 5 e 6, foi feita a divisão FOS/TAC para encontrar o valor da razão.

3.1.4 Determinação dos teores de zinco (Zn) e cobre (Cu)

Para determinação da concentração de zinco e cobre no processo de biodigestão anaeróbia, foram analisadas amostras em triplicata. Para proceder à análise, primeiramente foi feita a pesagem de 0,2500 g da amostra, com precisão de 0,0001 g, e transferida essa massa para o tubo de digestão do forno de micro-ondas acrescentando-se: 6 mL de ácido nítrico concentrado (HNO₃), 2 mL de peróxido de hidrogênio a 10% (H₂O₂) e 2 mL de água (H₂O) deionizada. Então a amostra foi colocada para ser digerida em forno de micro-ondas CEM Matthews, modelo Mars 6 230/60 com a potência de 574 W a ± 10 W e vasos de digestão de fluorcarbono (PFA ou TFM) com capacidade para suportar pressões até 7,5 ± 0,7 atm.

Após o processo de digestão, a amostra foi transferida para o balão volumétrico de 50 mL e o volume foi completado com água deionizada. O espectrômetro de absorção atômica, equipado com lâmpada para determinação de zinco e cobre e ajustado para leitura do comprimento de onda de cada metal foi calibrado com o branco e com as soluções-padrão geradas para elaboração das curvas de calibração para o cobre, com concentração de 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 mg.L⁻¹ e para o zinco com concentrações de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mg.L⁻¹.

Ressaltando que primeiramente foi feita a curva de calibração e as análises de um dos metais, com o equipamento devidamente programado para tal leitura, e depois se procedeu com as análises do outro metal, começando com a geração da curva de calibração. Salientando que a alíquota de amostra foi determinada de modo a situar a concentração da solução final de leitura na faixa intermediária da curva de calibração.

Finalmente para realizar a determinação das concentrações Zn e Cu, em mol.L⁻¹, foram feitas as leituras no espectrômetro de absorção atômica e calculada a porcentagem de zinco na amostra pela Equação 7.

$$Zn(\%m/m) = \frac{5C}{y} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

C = concentração de Zn na solução final de leitura (mg.L⁻¹)

y = massa da amostra, contida na alíquota do extrato (mg)

E de cobre pela Equação 8:

$$Cu(\%m/m) = \frac{5C}{y} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

C = concentração de Cu na solução final de leitura (mg.L^{-1})

y = massa da amostra, contida na alíquota do extrato (mg)

Sendo y calculado pela Equação 9:

$$y = \frac{1000AG}{Vb} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

G = massa inicial da amostra (g)

A = volume da alíquota tomada para a solução de leitura (mL)

Vb = volume do balão utilizado na etapa de extração (mL)

A Figura 11 mostra os equipamentos: forno de micro-ondas e espectrômetro de absorção atômica, utilizados para análise.

Figura 11 – (a) Forno de micro-ondas e (b) espectrômetro de absorção atômica



Fonte: Autor, 2018

3.1.5 Determinação de nitrogênio amoniacal e total

O teor de nitrogênio amoniacal e total foi determinado pelo método Kjeldahl que é dividido em três etapas: digestão, destilação e titulação. Inicialmente a amostra foi digerida com ácido sulfúrico concentrado sob aquecimento, fazendo a transformação do nitrogênio orgânico em íons amônio. Na segunda etapa foi obtida uma solução alcalinizada com hidróxido de sódio concentrado, em seguida a amônia produzida foi destilada e captada por uma solução de ácido bórico e titulada com ácido padronizado para determinação do nitrogênio.

3.1.6 Caracterização do biogás

Foram avaliadas as características da mistura gasosa gerada nas granjas da propriedade localizada em Rio Verde, de forma a identificar os gases gerados durante o processo de digestão

e suas concentrações. Para isso foi utilizado um analisador cromatográfico (CG) da marca PerkinElmer, modelo Clarus 580, com detectores do tipo FID (por ionização de chama) e TCD (condutividade térmica), equipado com metanador. A coluna capilar utilizada para o FID foi uma Elite Plot Q com 0,53 mm interno, 20 mm de espessura de filme de fase estacionária, 30 m de comprimento. A temperatura do injetor foi de 400°C, do detector FID 250°C, do detector TCD 200°C e do forno 60°C. Foi utilizado argônio como gás de arraste, devido à sua alta condutividade térmica, associado com ar sintético e gás hidrogênio para a geração da chama do FID e do metanador.

Para comparar os sinais gerados pelas amostras e padrões, foram utilizadas curvas de calibração geradas a partir de padrão primário gasoso, para os gases detectáveis: etano, dióxido de carbono, hidrogênio, metano, monóxido de carbono e nitrogênio. Para o armazenamento e transporte dos gases sem perda e alteração de suas concentrações, as amostras foram coletadas em bags confeccionados em tripla camada impermeável a gases, com mangueira acoplada com sistema de engate rápido do tipo macho-fêmea, adaptado para injeção do gás no cromatógrafo – Figura 12. As análises foram feitas em duplicata.

Figura 12 – (a) Cromatógrafo gasoso e (b) bag acoplado para análise



Fonte: Autor, 2018

3.1.6.1 Teor de ácido sulfídrico

Para determinação da concentração de ácido sulfídrico (H_2S) foi utilizado o equipamento de campo Biogás 5000 da marca Geotech, pois o CG PerkinElmer, modelo Clarus 580, não faz análise deste composto. Para análise o gás foi coletado no bag e acoplado à mangueira do equipamento, conforme instruções do mesmo, fazendo sempre duas injeções, em campo.

3.1.7 Eficiência de filtros para ácido sulfídrico

Foi realizada análise de eficiência do filtro de retirada do H_2S instalado antes do grupo

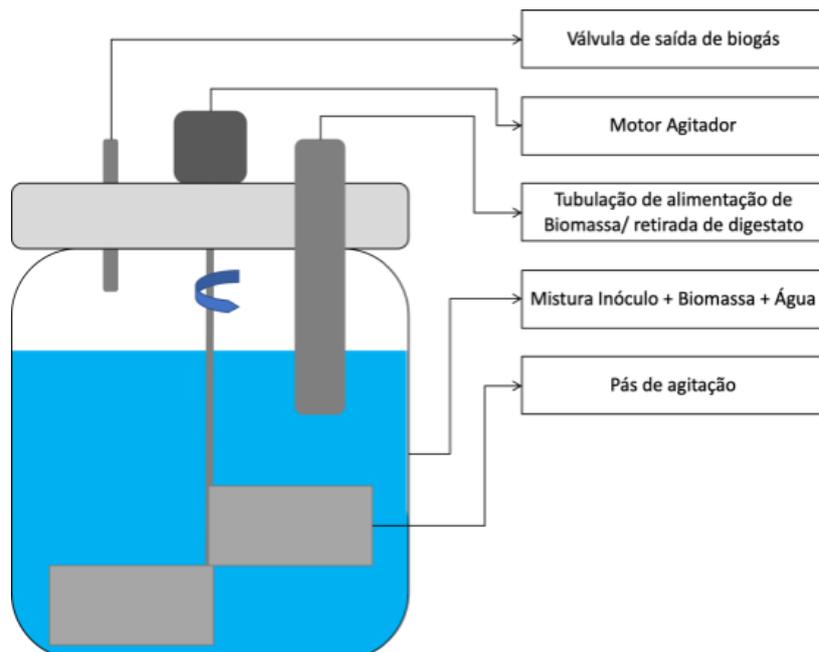
gerador de uma propriedade da região Sudoeste do Estado de Goiás através da análise de concentração antes e após a passagem da mistura gasosa pelo filtro, utilizando-se o equipamento Biogás 5000.

3.1.8 Determinação de potencial de biometano e codigestão

Foram realizados testes para identificar o comportamento da reação e seus resultados em escala de bancada utilizando biorreatores com 1,3 L de capacidade (1,1 L de volume útil e 0,2 L para expansão de gás), projetado e executado pelos engenheiros mecânicos do laboratório de Eng. Mecânica do IFG – Campus Goiânia, alimentados em batelada, com a finalidade de determinar o potencial de geração de biometano do dejetos suíno estudado. Para isso, foram confeccionados reatores em vidro com misturador instalado em uma tampa rosqueável usinada em poliacetal (*polyoxymethylene*) (Figura 13). Nesta tampa foram acopladas válvulas de saída de biogás, além de uma tubulação para retirada de digestato para análise. Para o transporte de biogás do interior do biorreator para o interior das bolsas coletoras de gás (*bags*), foram utilizadas mangueiras de *tygon*, tendo em vista que são impermeáveis para os gases em estudo.

Foram confeccionados 12 biorreatores idênticos, sendo que todos foram mantidos em banho termostático em um tanque plástico contendo água, mantendo-se a temperatura em $39\pm 1^\circ\text{C}$, dentro da faixa mesofílica, com o auxílio de uma resistência elétrica acionada via sistema micro controlado. A faixa mesofílica foi utilizada baseada na premissa de que o tratamento conduzido sobre essa faixa de temperatura resulta em maior produção de metano, justificado pelos relatos na literatura de que existem limitações quanto à estabilidade na fermentação de matérias-primas com alto teor de nitrogênio, como é o caso do dejetos suíno, levando a maior acúmulo de nitrogênio amoniacal, causando intoxicação das arqueas pela amônia, além do menor consumo energético (HANSEN et al., 1998 e SALMINEM et al., 2002).

Esse sistema teve ainda a função de controlar a agitação dos misturadores em tempos regulares – 1 min a cada intervalo de 20 min – misturando-se a suspensão contida no interior dos biorreatores, evitando dessa forma a deposição e/ou flotação de sólidos nos biorreatores por longo período. O ambiente anaeróbio dentro dos reatores foi obtido através da purga com gás nitrogênio.

Figura 13 - Representação gráfica do biorreator de 1,3L

Fonte: Autor, 2018

Essa análise foi dividida em três fases de testes, conforme descrito nos itens 3.1.8.1 a 3.1.8.3. Para os testes foram utilizados: inóculo de um reator de lagoa coberta alimentado com dejetos suíno localizado na região Sudoeste de Goiás, devidamente condicionado, conforme VDI 4630, denominado inóculo suíno; inóculo de um reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) do tratamento de efluentes da indústria Heinz em Nerópolis, Goiás, devidamente condicionado conforme VDI 4630, denominado inóculo Heinz; dejetos suíno de animais em fase de terminação de uma propriedade localizada na região Sudoeste de Goiás, denominado dejetos suíno; vinhaça e torta de filtro coletadas em uma usina de processamento de cana-de-açúcar localizada no município de Paraúna, Goiás; e bagaço de laranja lima. E para identificação mais fácil dos reatores foram criadas siglas para cada composição, seguindo o seguinte critério:

INO1 ou I1 – apenas inóculo suíno;

INO2 ou I2 – 85% de inóculo suíno e 15% de inóculo Heinz;

INO3 ou I3 - 85% de inóculo suíno e 15% de inóculo Heinz com aditivo de vinhaça;

DS – substrato de dejetos suíno;

B – codigestão com bagaço de laranja;

T - codigestão com torta de filtro;

V - codigestão com vinhaça;

PH – aditivo de vinhaça.

3.1.8.1 Potencial de biometano do dejetos suíno e codigestão com bagaço de laranja – teste 1

A primeira fase do experimento foi realizada em triplicata, sendo que todos os biorreatores foram alimentados uma única vez no início do experimento. Foram utilizados três reatores, compostos por inóculo suíno (branco) (INO1); três reatores contendo inóculo suíno e dejetos suíno (IIDS); três reatores contendo inóculo suíno, dejetos suíno e bagaço de laranja; (IIDSB) e por fim três reatores contendo o inóculo suíno e carcaça de suíno (ICAR).

A carcaça foi analisada como biomassa, pois a disposição desse resíduo é um problema para os produtores que precisam garantir a segurança sanitária da propriedade. Comumente a carcaça é tratada pelo processo de compostagem e traz um custo para o processo de suinocultura.

Para montagem dos reatores foi utilizada laranja lima, típica da região e usada pelas indústrias de suco da região. As laranjas foram cortadas em pedaços pequenos e depois trituradas em um liquidificador, então a mistura foi peneirada em uma peneira granulométrica de malha 20 e triplamente lavada para retirada de todo suco, a fim de simular o resíduo de processamento industrial do suco da laranja, conforme pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Preparação do bagaço de laranja

(a) Trituração no liquidificador; (b) Lavagem e peneiramento; (c) Amostra processada



Fonte: Autor, 2018

Para o preparo da carcaça, foram retiradas partes do couro, das vísceras e da carne do animal, visando obter uma amostra significativa mais próxima possível da mistura gerada no biodigestor industrial. As partes foram cortadas em pedaços pequenos e depois trituradas em um liquidificador, como na Figura 15.

Figura 15 - Preparação da carcaça

Fonte: Autor, 2018

Todas as amostras tiveram seus teores de matéria seca (MS) e matéria seca orgânica (MSO) identificados conforme metodologia descrita no item 3.1.2, para proceder a montagem dos reatores. Para tanto, foi utilizada a metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), a fim de determinar as proporções necessárias de substrato e inóculo em cada reator, sendo montados com proporções 2:1 de sólidos orgânicos voláteis (SOV) do inóculo e do substrato, ou seja, duas parte de SOV do inóculo para uma parte de SOV de substrato ou mistura de substratos, no caso da codigestão, completados até o volume de 1,1 L de capacidade (Figura 16), conforme método descrito pela VDI 4630. Sendo que nos reatores com mistura de dejetos com bagaço de laranja foi utilizada a proporção de SOV de 85% dejetos e 15% bagaço.

Figura 16 - Reatores de bancada 1,3 L

Fonte: Autor, 2018

Os reatores foram monitorados por 55 dias, quando atingiram sua estabilização, conforme definido pela VDI 4630 como o momento em que a produção diária de gás se torna igual ou inferior a 1% do volume total produzido.

3.1.8.2 Codigestão com bagaço de laranja, vinhaça e torta de filtro e mistura de inóculos – teste 2

Após análise dos resultados obtidos na primeira fase, foi realizada uma segunda etapa de caráter exploratório, visando alternativas para suprir as deficiências identificadas. Nesta fase do experimento, foram utilizados 12 biorreatores em escala de bancada, com capacidade para 1,1 L e volume vazio de expansão de gás de 0,2 L, montados em duplicata.

Todos os biorreatores foram alimentados uma única vez no início do experimento, sendo dois reatores (I e II) compostos por inóculo suíno e inóculo Heinz (branco); dois reatores (III e IV) contendo inóculo suíno, inóculo Heinz e dejetos suíno; além de quatro reatores (V, VI, VII e VIII) contendo inóculo, dejetos suíno mais uma mistura de vinhaça e torta de filtro, para codigestão, sendo que, desses quatro reatores, dois continham apenas inóculo suíno e dois inóculo suíno e inóculo Heinz; da mesma forma, outros quatro reatores (IX, X, XI e XII) foram montados contendo inóculo, dejetos suíno mais uma mistura de vinhaça e bagaço de laranja lima processada conforme descrito no item 3.1.8.1 para codigestão, sendo que, desses quatro reatores, dois continham apenas inóculo suíno e dois inóculo suíno e inóculo Heinz.

Todas as amostras tiveram seus teores de matéria seca (MS) e matéria seca orgânica (MSO) identificados conforme metodologia descrita no item 3.1.2. Para proceder à montagem dos reatores. Para tanto, foi utilizada a metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), a fim de determinar as proporções necessárias de substrato e inóculo em cada reator, sendo montados com proporções 2:1 de sólidos orgânicos voláteis (SOV) do(s) inóculo(s) e do(s) substrato(s), ou seja, duas partes de SOV do(s) inóculo(s) para uma parte de SOV de substrato ou mistura de substratos, no caso da codigestão, completados até o volume de 1,1 L de capacidade, acrescidos com água destilada, caso necessário, conforme método descrito pela VDI 4630. As proporções de SOV, em porcentagem, utilizadas nas duplicatas de reatores, estão demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporção de SOV por biomassa nos reatores de bancada - teste 2

Reatores	Sigla	Inóculo suíno	Inóculo Heinz	Dejetos suíno	Vinhaça	Torta de filtro	Bagaço de laranja
		SOV de inóculo (%)	SOV de inóculo (%)	SOV de substrato (%)			
I e II	INO2	85	15	0	0	0	0
III e IV	I2DS	85	15	100	0	0	0
V e VI	I2DSVT	85	15	85	1,5	13,5	0
VII e VIII	I1DSVT	100	0	85	1,5	13,5	0
IX e X	I2DSVB	85	15	85	1,5	0	13,5
XI e XII	I1DSVB	100	0	85	1,5	0	13,5

Os reatores foram monitorados por 43 dias, quando atingiram sua estabilização, conforme definido pela VDI 4630 como o momento em que a produção diária de gás se torna igual ou inferior a 1% do volume total produzido.

3.1.8.3 Codigestão com bagaço de laranja e torta de filtro, utilizando mistura de inóculos e correção de pH – teste 3

Considerando a análise dos resultados obtidos nas duas primeiras fases do experimento, foi realizada a terceira etapa para refinamento e verificação da melhor condição para maximizar a produtividade do biogás gerado a partir do substrato suíno estudado. Esta fase do experimento foi realizada em triplicata com 12 biorreatores em escala de bancada com capacidade para 1,3 L.

Todos os biorreatores foram alimentados uma única vez no início do experimento, sendo três reatores (I, II e III) compostos por inóculo suíno e inóculo Heinz (branco) e adicionado vinhaça para correção/redução do pH; três reatores (IV, V e VI) contendo inóculo suíno, dejetos suíno e adicionado vinhaça para correção/redução do pH; além de três reatores (VII, VIII e IX) contendo inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e torta de filtro, para codigestão, além da adição de vinhaça para correção/redução do pH; por fim três reatores (X, XI e XII) foram montados contendo inóculo suíno, inóculo Heinz, dejetos suíno e bagaço de laranja lima processada conforme descrito no item 3.1.8.1 para codigestão, além da adição de vinhaça para correção/redução do pH.

Todas as amostras tiveram seus teores de matéria seca (MS) e matéria seca orgânica (MSO) identificados conforme metodologia descrita no item 3.1.2 para proceder à montagem dos reatores. Para tanto, foi utilizada a metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), a fim de determinar as proporções necessárias de substrato e inóculo em cada reator, sendo montados com proporções 1:1 de sólidos orgânicos voláteis (SOV) do(s) inóculo(s) e do(s) substrato(s), ou seja, uma parte de SOV do(s) inóculo(s) para uma parte de SOV de substrato ou mistura de substratos, no caso da codigestão - conforme método descrito pela VDI 4630 – então foi acrescida vinhaça até a capacidade do reator, de forma que os reatores que continham substrato (IV ao XII) partiram com pH em torno de 7,2 e os reatores apenas com inóculo (I ao III) partiram com pH 7,4.

As proporções de SOV, em porcentagem, utilizadas nos reatores, assim como o volume de vinhaça acrescido, estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Proporção de SOV por biomassa nos reatores de bancada – teste 3

Reatores	Sigla	Inóculo su- íno	Inóculo Heinz	Dejeto su- íno	Torta de filtro	Bagaço de laranja	Vinhaça
		SOV de inóculo (%)	SOV de inóculo (%)	SOV de substrato (%)	SOV de substrato (%)	SOV de substrato (%)	Quantidade (ml)
I, II e III	INO3	85	15	0	0	0	400
IV, V e VI	I1DSPH	100	0	100	0	0	200
VII, VIII e IX	I3DSTPH	85	15	90	10	0	200
X, XI e XII	I3DSBPH	85	15	90	0	10	200

Os reatores foram monitorados por 45 dias, quando atingiram sua estabilização, conforme definido pela VDI 4630 como o momento em que a produção diária de gás torna-se igual ou inferior a 1% do volume total produzido.

3.1.8.3.1 Acompanhamento e análises dos biorreatores de bancada

Para as três fases de testes, após a montagem, o comportamento dos reatores foi acompanhado durante todo processo de geração de gás, fazendo a verificação da evolução do valor de pH, avaliado a cada 10 dias aproximadamente, medindo o volume gerado em cada reator, coletado nos *bags*, com um medidor volumétrico RITTER Drum-Type Gas Meters Series TG (Wet-Test), ilustrado na Figura 17, e a composição dos gases com uso da cromatografia gasosa no cromatógrafo (CG) PerkinElmer, como descrito no item 3.1.6 - Caracterização do biogás.

Figura 17 - Medidor volumétrico de biogás Ritter

Fonte: Autor, 2019

Foram também realizadas análises de pH, FOS/TAC, nitrogênio total e amoniacal, além de umidade, MS, MSI e MSO da parcela líquida ao final do processo para verificação de suas características. Além disso, para o teste 3 foram feitas também análise de fenol, visando verificar se devido a adição de vinhaça não houve a formação deste contaminante, realizada pelo laboratório KBF Química e ensaio para verificação da presença dos nutrientes: ferro, cálcio, cobalto, magnésio, manganês, molibdênio, níquel, enxofre, selênio e vanádio realizado no laboratório Aqualit Tecnologia em Saneamento.

Vale ressaltar que o inóculo foi analisado separadamente, já que ele é necessário no experimento para o *start up* do processo de biodigestão, disponibilizando microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia, mas também possui SOV, por isso a análise à parte. Sendo o volume gerado por ele subtraído nos demais reatores de acordo com a quantidade de SOV adicionada. Por isso a necessidade de realização do experimento de forma isolada, obtendo assim somente a produção de biometano referente a SOV das biomassas estudadas.

3.1.8.3.2 *Tratamento de dados do volume de gás*

As medições do volume e composição do biogás gerado pela biodigestão nos reatores de bancada foram realizadas sob condições de temperatura e pressão do laboratório, sendo assim, de acordo com Pham et al. (2013) é necessário realizar a conversão do valor para as “Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP)”, baseada na Lei de Charles, que afirma que o volume de gás varia de acordo com a temperatura e pressão.

As condições normais de temperatura e pressão (CNTP) referem-se às condições experimentais nas quais são adotadas 273,15 K, ou seja, 0°C e a pressão de 1013,25 hPa, ou seja, 1 atm. Considerando a temperatura média de Goiânia no período de realização dos experimentos de 26°C (299,1 5K) e pressão a 927,2 hPa (0,95 atm) (INMET, 2019). A Equação 10 demonstra o cálculo realizado para conversão do volume à STP ou N.

$$V_0 = \frac{V \times P \times T_0}{P_0 \times T} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

V_0 = volume de gás em estado normal (NL);

V = volume de gás lido (L);

P_0 = pressão normal (hPa);

P = pressão no momento da leitura (hPa)

T_0 = temperatura normal (K)

T = temperatura no momento da leitura (K)

3.1.9 Elaboração de manual prático

Após o mapeamento da situação atual, com levantamento de dados de processos em operação e identificadas as condições de contorno que influenciam a produção do biogás, constatados os fatores que estão influenciando na produção da geração da mistura gasosa com a realização de testes laboratoriais, e aplicados ajustes experimentais, foi elaborado documento contendo procedimentos operacionais necessários para maximização dos resultados da geração de biogás utilizando biodigestores de lagoa coberta alimentado com dejetos suíno.

Para elaboração do manual, foi desenvolvida também uma revisão sistemática da bibliografia existente, incluindo documentos já publicados com o propósito de oferecer embasamento técnico para implantação e operação de biodigestores.

O principal objetivo foi gerar um documento que contenha informações simples e objetivas, acessível a produtores que possuam ou que pretendam possuir biodigestores para tratamento dos efluentes e geração de energia, de forma que se possa ter embasamento para tomada de decisão sobre nível de tecnologia instalado, processos de monitoramento e ações de controle e melhoria. O escopo do manual abrange todo o processo, desde o manejo do animal, passando pelo monitoramento e controle do processo de biodigestão até o uso do biofertilizante gerado para fertirrigação, sendo que, para isso foi realizada parceria com profissionais da área de zootecnia especialistas em suinocultura e engenheiro agrônomo com diversas pesquisas com enfoque na área de biogás e biofertilizante.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2.1 Levantamento da prática de suinocultura no Estado de Goiás

Foi constatado que o processo de manejo de suínos se dá em regime de confinamento, onde os animais são alojados em galpões. Os galpões são divididos em baias que comportam uma quantidade limitada de animais. Há dois tipos de piso mais comuns: impermeabilizado feito de material cimentício, com a lâmina d'água se formando na parte mais baixa da baia, reservada para o acúmulo dos dejetos; e piso ripado, onde há uma grade suspensa por vigas formando um vão entre o piso impermeável e o piso ripado onde se instalam os animais, de forma que a lâmina com os dejetos se forma nesse vão. As paredes são construídas apenas até a altura que impeça a saída dos animais (tipo mureta), sendo fechadas a partir de então com grades, permitindo circulação de ar e entrada de luz, havendo o controle de entrada de insolação por lonas.

O processo de criação dos suínos se inicia com a produção dos leitões, onde ficam as matrizes que são inseminadas para dar início à gestação. Os leitões novos permanecem na maternidade por cerca de 20 dias, então são levados para a creche, onde permanecem por mais cerca de 40 dias. Com idade em torno de 60 dias, o animal passa ao processo de recria e terminação, quando vai haver o ganho de massa até chegar ao peso ideal para o abate, completando um ciclo de cerca de 180 dias. Esses processos podem ou não ocorrer dentro da mesma propriedade, sendo que geralmente a granja de terminação é diferente do local do processo inicial de produção de leitão.

Os animais são alimentados com dietas formuladas para atender as necessidades nutricionais dos suínos em cada fase de crescimento de acordo com as recomendações contidas nas TABELAS BRASILEIRAS PARA AVES E SUÍNOS - 2017. Desta forma, como há variação na ração e no metabolismo do animal nas diferentes fases de crescimento, varia-se consequentemente as características dos dejetos ao longo do processo de crescimento e engorda.

Com o levantamento realizado no processo de manejo, foi observado que há uma predominância de biodigestores do tipo lagoa coberta para tratamento de dejetos suínos no Estado de Goiás. Em meados da primeira década dos anos 2000 foram implantados cerca de 80 biodigestores em propriedades da região Sudoeste de Goiás através de projetos e programas de empresas instaladas ali impulsionadas pela exploração de crédito de carbono, porém o gás gerado na época era apenas queimado, não havendo aproveitamento para fins energéticos (FGV, 2007). Atualmente muitos desses reatores foram desativados pelos produtores e funcionam apenas como lagoa de estabilização. Além disso, no ano de 2019, estão em processo de instalação mais 180 biodigestores na região.

A água consumida pelos proprietários rurais para a criação dos animais é proveniente de poços artesianos e não há cobrança pelo uso desse recurso. Sendo que em algumas propriedades não há nem mesmo controle do consumo através de instalação de hidrômetro. Desta forma, se constata o uso excessivo de água no processo de manejo, incluindo nos bebedouros dos animais. O quadro se agrava impulsionado ainda pelas altas temperaturas registradas na maior parte do ano no Estado, o que gera aumento no consumo de água pelos animais e consequentemente aumenta a diluição do dejetos encaminhado aos biodigestores.

Os biodigestores são alimentados duas vezes ao dia, uma pela manhã quando é feita a retirada de toda a lâmina d'água, e no final da tarde, quando há apenas a eliminação do excesso de água da lâmina, havendo uma retirada parcial do volume.

3.2.2 Análise de biodigestores em operação na Região de Rio Verde - Goiás

Foi realizado estudo do processo de biodigestão em uma propriedade localizada no município de Rio Verde, Região Sudoeste do Estado de Goiás, que possui cerca de 12.700 suínos em processo de terminação. Os animais são divididos em três núcleos (granjas) de quatro galpões, sendo que cada núcleo alimenta um par de biodigestores em operação. Cada grupo de galpões leva o nome de uma granja, sendo elas: Agropecuária, Ricardo e Ivan.

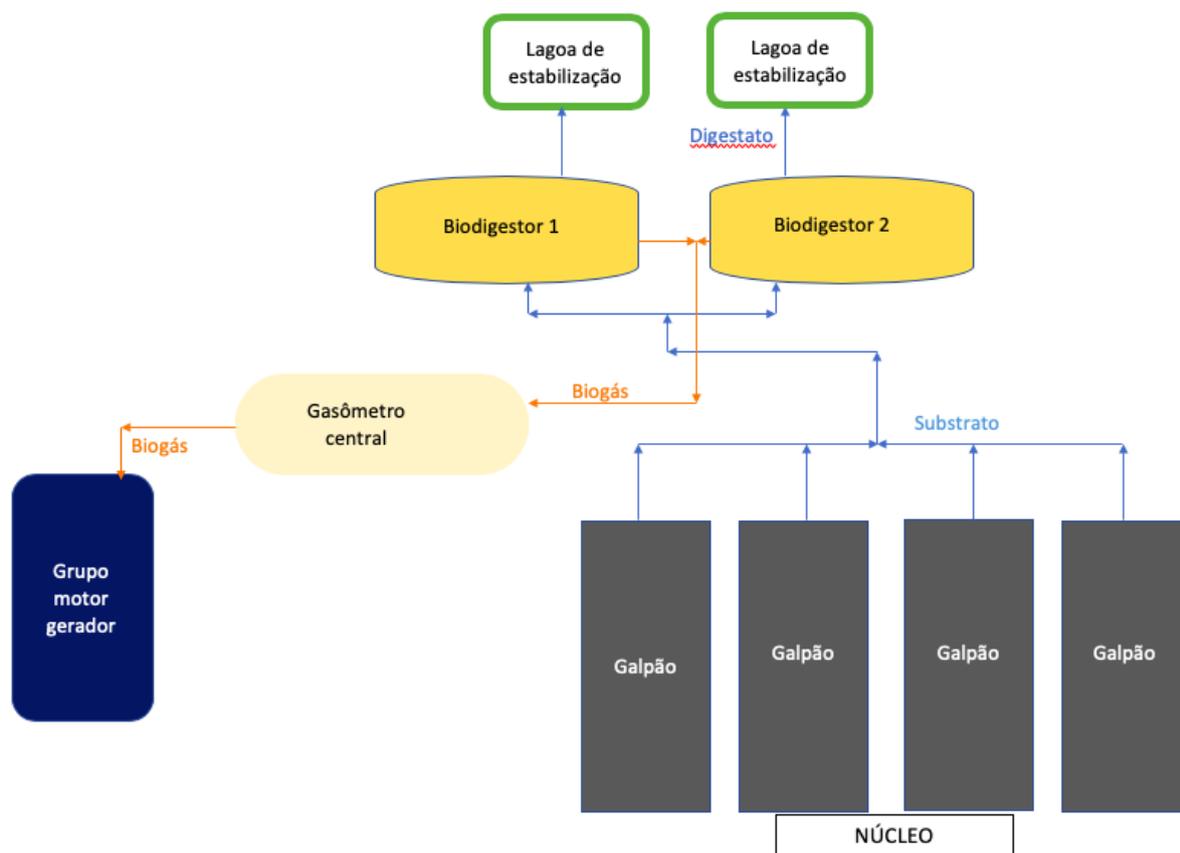
Todo gás gerado nos seis reatores é enviado a um gasômetro central, através de um compressor que possui seu tempo de funcionamento regulado pela pressão dentro dos gasômetros de cada reator. Do gasômetro central o gás é enviado para um grupo gerador da marca ERBR Soluções em energia e biometano, modelo GSCA330 com potência de 330 KVA, que transforma o biogás em energia elétrica, ilustrado na Figura 18. A Figura 19 demonstra através de um diagrama esquemático a distribuição das instalações da Granja Agropecuária.

Figura 18 - Grupo gerador a biogás



Fonte: Autor, 2018

Figura 19 - Diagrama das instalações da Granja Agropecuária



Fonte: Autor, 2019

Foram coletadas amostras de substrato (entrada do biodigestor) e digestato (saída do biodigestor) na Granja Agropecuária, sendo que do digestato foram colhidas amostras em cada saída do par de biodigestores. A partir dessas amostras foram realizadas análises de matéria orgânica, pH e FOS/TAC. Além das amostras de biogás, conforme segue.

3.2.2.1 Análise de matéria orgânica no digestato e substrato dos biodigestores da Granja Agropecuária

A partir das amostras coletadas de digestato e substrato, foram realizadas análises de matéria orgânica, incluindo matéria seca (MS), matéria seca orgânica (MSO), matéria seca inorgânica (MSI) e umidade, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Porcentagem de matéria seca e umidade na entrada (substrato) e saída (digestato) dos biodigestores da Granja Agropecuária

Amostra	MS (%)	MSO (%)	MSI (%)	% MSO na MS	Umidade (%)
1 - Entrada do biodigestor (substrato)	3,93	3,35	0,58	85,32	96,07
2 - Saída biodigestor 1 (digestato)	1,36	1,02	0,33	75,58	98,62
3 - Saída biodigestor 2 (digestato)	1,29	0,92	0,37	71,30	98,71

De acordo com a FNR (2010), o teor MS no substrato é de 6%, e após o processo de digestão o dejetado líquido suíno apresenta de 4% a 7% de MSO no digestato e 75% a 86% de MSO no total de MS. Pode-se observar na Tabela 6 que essas porcentagens se encontram com valores inferiores à referência, o que representa indício de que os microrganismos responsáveis pela digestão estão subnutridos, ou seja, a quantidade de MSO não está sendo suficiente para manter a biota.

A queda de matéria seca (MS) na saída do processo ocorre também devido à baixa turbulência dentro da lagoa, o que causa a deposição do material em suspensão. Porém, a redução na proporção da MSO em relação MS foi significativa, já que a matéria orgânica é consumida durante o processo de geração de biogás.

3.2.2.2 Análise de FOS/TAC e pH no digestato dos biodigestores da Granja Agropecuária

A relação FOS (ácidos orgânicos voláteis)/TAC (carbono inorgânico total) é fator relevante para avaliar o processo, pois a carga orgânica volumétrica do digestor é um fator importante para a avaliação da carga biológica do processo. Ela indica a quantidade de matéria orgânica seca que pode ser introduzida na lagoa sem alimentar demasiadamente as bactérias do biodigestor, o que pode causar acidificação do processo, conforme afirmam Rieger e Weiland (2006).

Os resultados obtidos foram avaliados a partir dos parâmetros observados pela FNR (2010) e por Rieger e Weiland (2006), como observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Avaliação dos índices de FOS/TAC de acordo com a experiência empírica

Índice FOS/TAC	Condição
>0,6	Entrada altamente excessiva de biomassa
0,5-0,6	Entrada excessiva de biomassa
0,4-0,5	Planta com excesso de biomassa
0,3-0,4	Produção de biogás no máximo
0,2-0,3	Entrada de biomassa baixa
<0,2	Entrada de biomassa muito baixa

Fonte: Adaptado RIEGER e WEILAND, 2006

Expõem-se na Tabela 8 os resultados encontrados a partir das análises das amostras dos biodigestores da Granja Agropecuária

Tabela 8 - Valores de pH e FOS/TAC na entrada e saída dos biodigestores da Granja Agropecuária

Amostra	pH inicial médio	FOS/TAC médio
1 - Entrada do biodigestor	7,0	-
2 - Saída biodigestor 1	8,3	0,2
3 - Saída biodigestor 2	8,2	0,1

A faixa de pH ótima para formação de metano é estreita e se situa entre cerca de 7,0 e 7,5, embora a formação de gás também seja possível acima e abaixo dessa faixa (FNR, 2010). Pode-se observar a partir da Tabela 8 que o pH aumenta de 7,0 para 8,3/8,2 após o processo de digestão. Esse fato pode ocorrer devido ao processo de decomposição de compostos nitrogenados que ocasionam a liberação de amônia. A amônia livre (NH_3), não iônica, pode prejudicar as bactérias mesmo em pequenas concentrações, pois ela se encontra em equilíbrio com a concentração de amônio (NH_4^+), já que a amônia reage com a água formando o íon amônio e um íon OH^- e vice-versa. Portanto, se a concentração dos íons OH^- se elevar e tornar o pH muito alcalino, o equilíbrio se desloca e a concentração da amônia aumenta. A elevação do pH de 6,5 para 8,3 leva a um aumento de 30 vezes na concentração de amônia livre. (FNR, 2010).

A Tabela 7 mostra que a relação FOS/TAC não pode ser superior a 0,6, sendo a faixa ideal em torno 0,3 a 0,4 (FNR, 2010; RIEGER e WEILAND, 2006). A relação FOS/TAC 0,2 e 0,1 na saída dos biodigestores analisados, como visto na Tabela 8, demonstra que a entrada de biomassa está muito baixa, ou seja diluída, e há pouca matéria orgânica disponível para os microrganismos presentes, o que reforça a análise realizada a partir dos dados de matéria seca.

Porém o processo não está totalmente inibido, como ocorre nos casos em que a relação FOS/TAC é muito elevada.

A geração de uma alcalose pode ocasionar um rendimento insatisfatório de biogás. Visando buscar uma solução para o problema identificado é necessário verificar a relação C/N no substrato e avaliar de que forma está ocorrendo a alimentação (tempo de retenção/quantidade) do biodigestor, pois os microrganismos estão sendo subalimentados.

3.2.2.3 Análise de Cobre e Zinco no digestato e substrato dos biodigestores da Granja Agropecuária

Foram realizadas análises de cobre e zinco nas amostras coletadas de digestato e substrato, com o objetivo de verificar se esses micronutrientes estão em concentração ideal ou em concentração tóxica para as arqueas no biodigestor. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Concentração de Zn e Cu na entrada (substrato) e saída (digestato) dos biodigestores da Granja Agropecuária

Amostra	Média zinco (mg.kg ⁻¹ de MS)	Média cobre (mg.kg ⁻¹ de MS)
Entrada do biodigestor	743	867
Saída do biodigestor 1	1488	904
Saída do biodigestor 2	1291	802
Referência no biodigestor (FNR, 2010)	30 - 400 (ideal 200)	10 - 80 (ideal 40)

Pode-se observar na Tabela 9 que as concentrações de zinco e cobre estão bem acima dos valores considerados tóxicos para as arqueas metanogênicas e que há concentração dentro do biodigestor devido, principalmente, a deposição desses componentes, acarretando queda na produção de gás. Vale ressaltar que o cobre e o zinco são considerados micronutrientes nas concentrações ideais.

Esses metais são provenientes da alimentação dos suínos, como visto na Tabela 2. Desta forma, percebe-se que embora a presença de zinco e cobre nessas concentrações prejudiquem o desempenho da produção de biogás, a atividade fim da suinocultura é a produção de suínos, ou seja, a engorda dos animais. Por esse motivo, nem sempre o ponto ótimo poderá ser alcançado, no entanto a produção de biogás não é inviabilizada.

3.2.2.4 Análise da composição do biogás em um grupo com 3 (três) biodigestores

Foram coletadas amostras de biogás em *bags* após o compressor dos três pares de biodigestores instalados na propriedade. A partir das amostras coletadas foi feita análise da composição dos principais gases presentes na mistura utilizando o cromatógrafo (CG), conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Média dos componentes da mistura de biogás por granja

Componente	Médias (% Vol)			Coeficiente de variação
	Granja Agropecuária	Granja Ricardo	Granja Ivan	
Metano	69,30	70,37	70,10	±0,007
Dióxido de carbono	29,30	30,57	27,99	±0,044
Nitrogênio	1,98	0,82	2,23	±0,448

A partir do apresentado na Tabela 10, pode-se verificar que a qualidade do biogás produzido é alta, considerando que a referência para o teor de metano no biogás é de 50% a 75% (FNR, 2010) e os resultados mostraram média de 70,10% de metano na mistura gerada. Sendo que quanto maior o teor de metano na mistura, melhor para aproveitamento energético. Vale ressaltar ainda que o coeficiente de variação entre as amostras coletadas nas três granjas é próximo a zero, o que indica que a qualidade do gás se mantém nos biodigestores de todas as granjas avaliadas, inclusive nos biodigestores da Granja Ivan, onde não há agitador instalado. O que demonstra que manejos semelhantes dos animais em diferentes granjas resultam em biogás com características similares, evidenciando que o estudo do biogás realizado em uma granja pode ser extrapolado para outras da região, pois apresentarão resultados semelhantes. No entanto, para avaliar a eficiência do processo de biodigestão é necessário também analisar produtividade e rendimento (FNR, 2010).

3.2.2.5 Análise do filtro para ácido sulfídrico

O ácido sulfídrico (H_2S) é o principal composto indesejável presente no biogás, desta forma precisa ser removido em praticamente todos os usos energéticos. A substância é formada espontaneamente durante o processo de metanização devido à presença de compostos de enxofre no substrato e seu direcionamento aos sistemas de aproveitamento energético deve ser evitado, devido à formação de óxidos de enxofre durante o processo de combustão, os quais são altamente solúveis em água, o que reduz a vida útil das tubulações e dos equipamentos devido à sua característica corrosiva (FEAM, 2015).

O H_2S é um gás que confere mau odor, além de ser corrosivo e tóxico (HENDRICKSON et al., 2004; NI et al., 2000). Dependendo da composição do substrato utilizado na biodigestão anaeróbia, o biogás bruto produzido poderá apresentar concentrações de H_2S que variam entre 100 e 10.000 ppm (BEIL e BEYRICH, 2013).

Apesar de ser um gás inflamável que contribui no potencial energético do biogás, a presença do H_2S causa corrosão nos tanques de armazenamento, tubulações metálicas e motores de combustão, e resulta na deterioração da infraestrutura de produção do biogás (GARCIA-ARRIAGA et al., 2010).

Lins, Mito e Fernandes (2015) verificaram que apesar da biodigestão de substratos de suinocultura e avicultura apresentarem grandes teores de metano, apresentam também concentração de H_2S superior à outras unidades, havendo uma grande variação na concentração de H_2S que, embora menor que 3% do volume total do biogás, dependendo de sua destinação torna-o limitado para uso.

Por isso há instalado antes do conjunto gerador para conversão do biogás em energia elétrica um filtro fornecido pela empresa ER-BR para remoção de H_2S contido na mistura gasosa, visando reduzir o processo corrosivo causado pela presença do ácido.

Para análise de eficiência do filtro foi feita coleta do gás em campo com uso do equipamento Biogás 5000 antes do filtro, que apontou concentração de 3.329 ppm de H_2S e após o filtro, com concentração de 528 ppm de H_2S . Pode-se observar que houve uma redução de 6,3 vezes na concentração de H_2S após a passagem pelo filtro, demonstrando que o equipamento possui alguma eficiência. Porém a concentração remanescente ainda é capaz de causar danos ao sistema em operação estando acima do valor definido pelas diretrizes da DVGW G 260 que é de 1ppmV. Desta forma, é preciso propor medidas para otimizar esse processo, podendo-se instalar filtros em série e/ou utilizar filtros mais eficientes.

3.2.3 Potencial de produção de biometano e codigestão

A etapa de experimentos de laboratório com biorreatores de bancada teve como objetivo verificar o potencial de geração de biogás do substrato de dejetos suínos e identificar quais adequações se mostram mais apropriadas para suprir as deficiências identificadas resultando em um maior potencial de produção de biogás. Desta forma, foram avaliados cosubstratos disponíveis na região, adição de vinhaça para ajuste de pH e mistura com inóculo industrial visando renovar a biota presente.

Comumente é identificado nos processos de geração de biogás por lagoa coberta a subalimentação dos reatores devido, principalmente, ao excesso de água durante o manejo dos animais – como constatado durante análise de biodigestores em operação na região de Rio

Verde – Goiás, além de que o substrato estudado já é deficiente em alguns nutrientes essenciais para o crescimento das bactérias e arqueas, o que conseqüentemente compromete a geração de metano. O esterco suíno é caracterizado pela alta capacidade tampão, pela variedade de micro e macronutrientes necessários para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. No entanto, possui elevada concentração de nitrogênio e amônio e baixo teor de matéria orgânica (HARTMANN e AHRING, 2006).

Os dejetos suínos se caracterizam por serem muito diluídos, juntamente com uma fração elevada de fibras, principal razão para a baixa produção de metano por peso (FERREIRA, DUARTE e FIGUEIREDO, 2012). Desta forma, para que a codigestão anaeróbica seja bem sucedida, é necessário o equilíbrio de vários parâmetros da mistura do cosubstrato: macro e micronutrientes, relação C/N, pH, compostos tóxicos, matéria orgânica biodegradável e matéria seca (HARTMANN et al., 2003).

Para Abalde et al. (2016), o sucesso da codigestão consiste na seleção de substratos que preencham as deficiências do substrato escolhido. Weiland (2000) identificou que os resíduos suínos, quando codigeridos com outros resíduos, proporcionam o ajuste da relação C/N, diminuindo assim o risco de inibição de amônia, ajuste de micro e macronutrientes necessários para os microrganismos metanogênicos, além de aumentar a capacidade de tamponamento.

Para Caillot et al. (2017), a codigestão anaeróbica é uma alternativa viável e de baixo custo para resolver os problemas relacionados à monodigestão. A principal vantagem do processo está em ser simples e de baixo custo para superar as desvantagens ligadas às características do substrato. Trata-se de tecnologia promissora e comprovada para o tratamento de resíduos orgânicos como resíduos orgânicos industriais, estrume animal e resíduos agrícolas.

3.2.3.1 Seleção das biomassas para codigestão

Os resíduos utilizados para codigestão são comumente provenientes da agroindústria e a seleção destes resíduos se dá em função da sua disponibilidade na área geográfica das unidades de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Desta forma, os substratos foram selecionados devido à sua disponibilidade na região somada às suas características para fornecer os nutrientes necessários ao processo, visando aumentar a carga orgânica no biodigestor e promover o equilíbrio do processo evitando a subalimentação dos microrganismos e aumentando a produção de metano, com isso buscando a não alcalinização do meio. Desta forma, para o presente trabalho foram utilizados como cosubstratos o bagaço de laranja, a torta de filtro e a vinhaça proveniente do processo de produção de etanol.

3.2.3.2 Testes com reatores de bancada

Resultados do teste 1

A Tabela 11 traz os teores de matéria seca, umidade e o pH das biomassas utilizadas na digestão anaeróbia do teste 1 realizado em triplicata com os reatores de bancada. Esses teores foram utilizados para calcular a proporção nos reatores e estabelecer a quantidade total de MSO por reator.

Tabela 11 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 1

Amostra	MS (%)	MSO (%)	MSI (%)	% MSO na MS	Umidade (%)	pH
Inóculo suíno	2,08	1,76	0,31	84,94	97,92	7,9
Dejeto suíno	3,97	3,23	0,75	81,24	96,03	7,1
Bagaço laranja	11,02	10,87	0,15	98,61	88,98	4,8
Carcaça de suíno	30,90	30,14	0,77	97,52	69,10	-

O inóculo suíno apresentou o menor teor de MSO, com 1,76%, o que é esperado considerando que como constatado o dejeto suíno é um resíduo com alto teor de umidade (96,03%) e a matéria orgânica presente já foi em grande parte digerida. A porcentagem de MSO na MS do dejeto suíno de 81,24 está próxima dos 80% encontrado pela FNR (2010).

O bagaço de laranja apresentou teor de umidade de 88,98%, resultado similar aos obtidos por Siles et al. (2016), Martin et al. (2010) e Santos (2018), que obtiveram teores de umidade em torno de 80% - teor de umidade favorável para codigestão anaeróbia - além de pH ácido variando na faixa de 3,0 a 4,0, sendo que o valor de pH encontrado foi 4,8. Já a carcaça apresentou o menor índice de umidade, porém ainda viável para digestão úmida, já que foi misturada, na proporção 2:1, com o inóculo suíno.

Os reatores foram montados de forma que tivessem a mesma quantidade de MSO de inóculo e de substrato, ou mistura de substratos, em uma proporção de 2:1, como pode ser visto na Tabela 12, totalizando 22,82 g de MSO por reator, exceto no caso do inóculo onde não é acrescido substrato, pois este é utilizado apenas para abater a produção de biogás do inóculo ao final do experimento.

Tabela 12 - Composição dos reatores - teste 1

Reator	Massa de inóculo suíno (g)	Massa de dejetos suíno (g)	Massa de carcaça (g)	Massa de bagaço de laranja (g)	Massa total de MSO (g)
INO1	864,48	-	-	-	15,21
IIDS	864,48	235,52	-	-	22,82
IIDSB	864,48	200,19	-	10,50	22,82
IICAR	864,48	-	25,24	-	22,82

A Tabela 13 traz os valores de nitrogênio amoniacal Kjeldahl e total do inóculo e do dejetos suíno retirados de uma granja de suínos antes de se iniciar o teste 1 e do efluente gerado ao final dos 55 dias de experimento nos reatores que continham substrato.

Tabela 13 - Quantidade de nitrogênio amoniacal e total nas amostras antes e após o teste 1

Amostra		Nitrogênio Amoniacal Kjeldahl (mg.L ⁻¹)	Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹)
Antes de iniciar o teste 1	Inóculo	3.544	3.565
	Dejetos suíno (substrato)	3.354	3.838
Ao final do teste 1	IIDS	3.447	3.453
	IIDSB	3.090	3.102
	IICAR	2.831	2.841

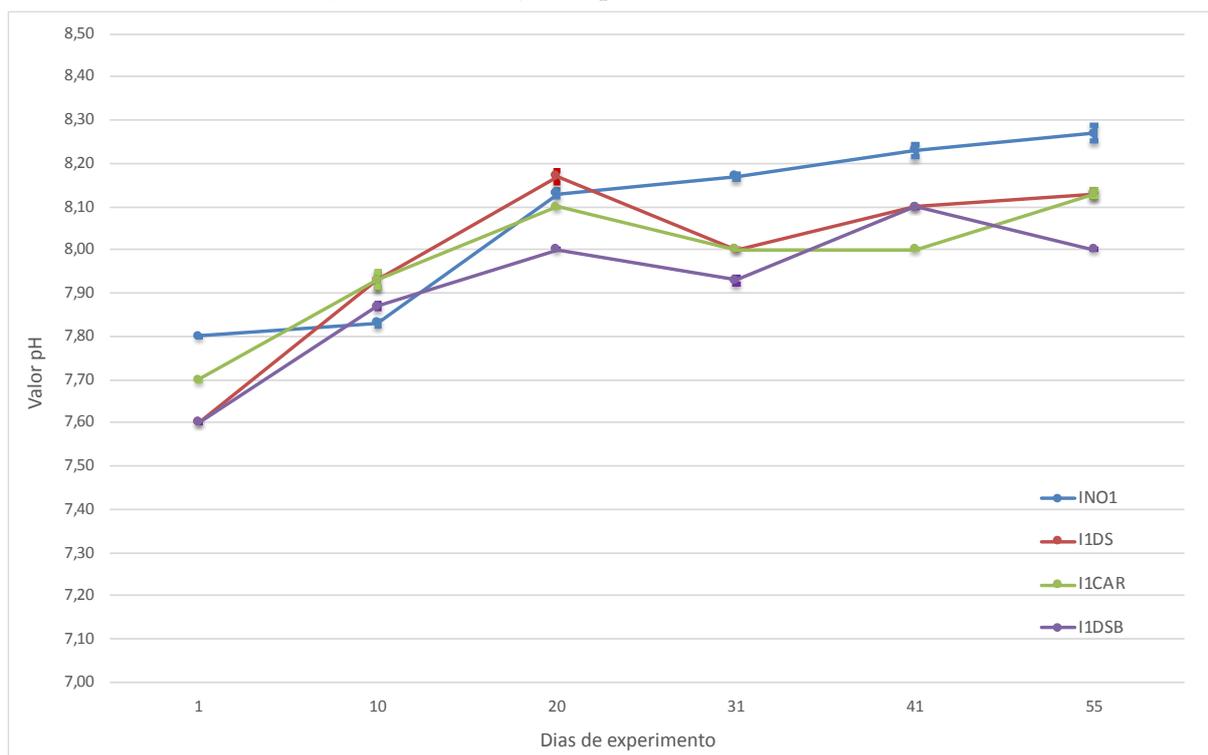
Segundo Schnürer (2010), o excesso de nitrogênio em meios anaeróbios pode levar à desestabilização do processo devido à formação de amônia. Este composto é formado principalmente quando se opera um biodigestor com pH próximo a 9,0 e com substratos ricos em nitrogênio. A concentração da amônia é proporcional à temperatura e ao pH, sendo maior em meio termofílico e pH elevado (AL SEADI et al., 2008).

O limiar de inibição de um sistema de digestão não adaptado a elevadas concentrações de nitrogênio se encontra na faixa de 80 a 250 mg.L⁻¹ NH₃, isso corresponde a uma concentração de amônio entre 1.700 e 4.000 mg.L⁻¹, dependendo do valor do pH e da temperatura de fermentação. A experiência mostra que, na presença de uma concentração total de nitrogênio amoniacal entre 3.000 e 3.500 mg.L⁻¹, é esperado que o processo de formação do biogás comece a ser inibido pelo nitrogênio (FNR, 2010; SEYFRIED et al., 1990).

Na Tabela 13 pode-se observar que a concentração de nitrogênio amoniacal no inóculo se encontra acima de 3.500 mg.L^{-1} o que está acima do valor de referência. Temos também que o valor encontrado na amostra do inóculo – antes do teste 1 - é próximo ao valor encontrado após a biodigestão do dejetos suíno inoculado nos reatores de bancada (reator IIDS), resultado esperado, já que o inóculo é o dejetos suíno digerido no biodigestor industrial em operação na granja no Sudoeste goiano, o que demonstra que para esse parâmetro não houve diferença significativa na digestão realizada em laboratório e na propriedade.

O dejetos suíno antes do início da digestão anaeróbia já possui concentração de nitrogênio amoniacal e nitrogênio total elevada devido, principalmente, às características da excreta de suínos rica em nitrogênio. A mistura de biomassas de dejetos suíno com bagaço de laranja foi a que apresentou a menor concentração de nitrogênio amoniacal, 2831 mg.L^{-1} , estando pouco abaixo da concentração de inibição.

Segundo a FNR (2010), a faixa de pH ótima para formação de metano é estreita e se situa entre cerca de 7,0 e 7,5, embora a formação de gás também seja possível acima e abaixo dessa faixa. Pode-se observar na Figura 20 que o pH no interior dos reatores na data de partida do experimento já se encontrava acima do ideal na faixa entre 7,6 – para a mistura de inóculo com carcaça (IICAR) e inóculo com dejetos e bagaço de laranja (IIDSB) e 7,8 – para o inóculo (INO1). Sendo que nos primeiros 20 dias o pH aumentou em todos os reatores, ocorrendo de forma mais acentuada na mistura de inóculo com dejetos. No 31º dia observou-se uma leve redução do pH nos reatores contendo substrato, não ocorrendo essa redução apenas no reator contendo somente inóculo, o que é esperado, já que durante o processo de biodigestão anaeróbia, mais especificamente na acidogênese, são formados ácidos orgânicos, o que pode causar uma redução do pH.

Figura 20 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 1

Ao final do 55º dia de experimento, o INO1 apresentou o maior valor de pH, 8,2, seguido pelo I1DS e I1CAR, com pH 8,1 e então pelo I1DSB com pH 8,0. O aumento de pH identificado pode ocorrer devido ao processo de decomposição de compostos nitrogenados que ocasionam a liberação de amônia. A amônia livre (NH_3), não iônica, pode prejudicar as bactérias mesmo em pequenas concentrações, pois ela se encontra em equilíbrio com a concentração de amônio (NH_4^+), já que a amônia reage com a água formando o íon amônio e um íon OH^- e vice-versa. Portanto, se a concentração dos íons OH^- se elevar e tornar o pH muito alcalino, o equilíbrio se desloca e a concentração da amônia aumenta. A elevação do pH de 6,5 para 8,3 leva a um aumento de 30 vezes na concentração de amônia livre (FNR, 2010). Esse cenário é indício que pode estar havendo inibição por amônia, e a geração de alcalose pode ocasionar um rendimento insatisfatório de biogás.

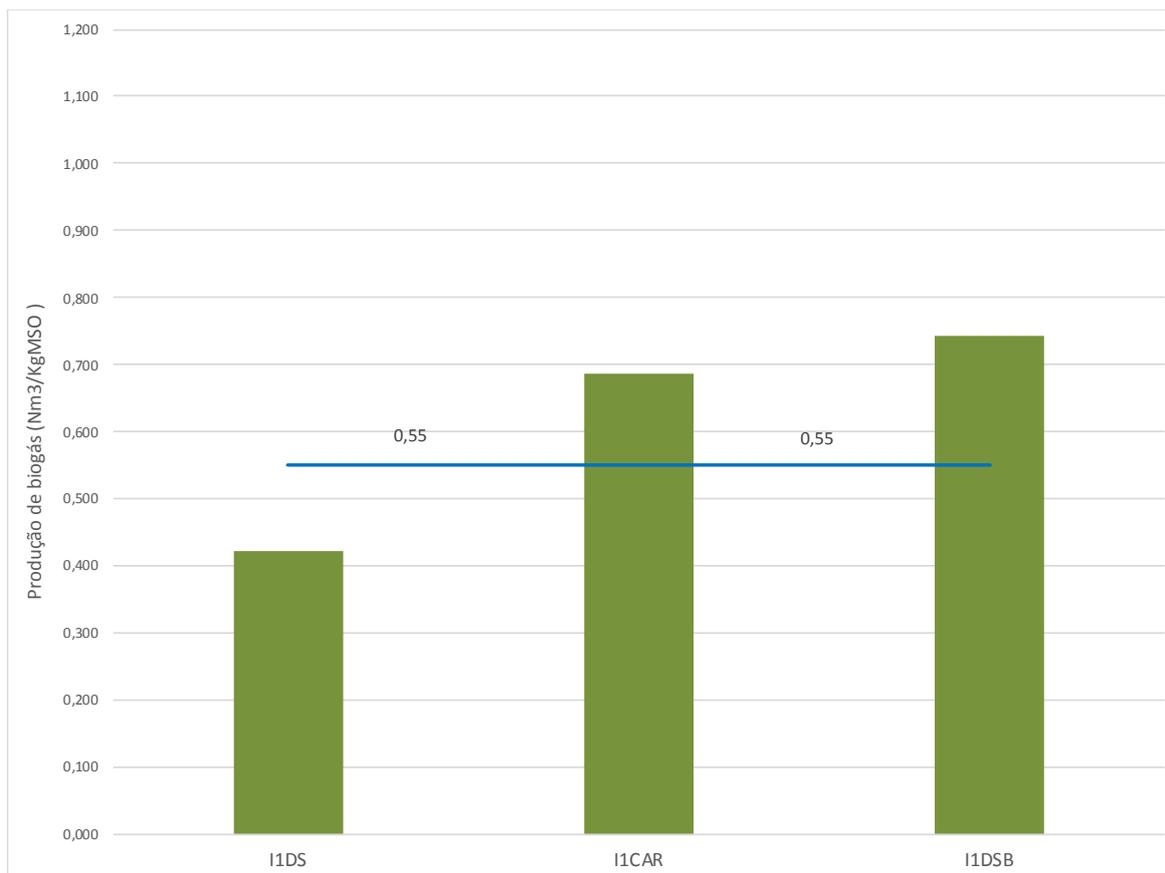
Na Tabela 14 podem-se observar os teores de sólidos e umidade obtidos nos reatores após a finalização do experimento. As porcentagens de sólidos orgânicos voláteis (SOV) após a biodigestão se encontram com teores baixos, o que evidencia que a matéria orgânica disponível foi digerida durante o experimento, considerando que os reatores foram alimentados uma única vez. Para reforçar esta análise, foram obtidos os valores de FOS/TAC que se encontraram em todos os reatores próximo a zero. A constatação do baixo teor de SOV e baixo FOS/TAC pode ser evidência de que os microrganismos responsáveis pela digestão estão subnutridos, ou seja, a quantidade de matéria orgânica não está sendo suficiente para manter a biota.

O teor de SOV no total de sólidos totais (ST) se mostrou elevado nos quatro conjuntos de reatores, especialmente no I1DS e I1CAR, o que evidencia que a matéria seca remanescente é constituída, em sua maioria, por matéria orgânica, resultado esperado já que o dejetos é constituído basicamente por fezes, urina, ração e água.

Tabela 14 - Caracterização final dos reatores - teste 1

Reator	ST (%)	SOV (%)	SI (%)	% SOV no ST	Umidade (%)
INO1	0,56	0,42	0,15	74,27	99,44
I1DS	0,87	0,70	0,17	80,17	99,13
I1DSB	1,55	1,13	0,42	72,65	98,45
I1CAR	0,74	0,67	0,06	91,31	99,26

O gás gerado ao longo do teste 1 até seu esgotamento, após 55 dias, caracteriza o potencial de produção de biogás da biomassa analisada e a média do volume acumulado na triplicata de reatores foi analisado em relação ao total de MSO dos substratos, conforme pode ser visto na Figura 21. De acordo com o Centro Internacional de Energias Renováveis - Cibiogás (2018) o potencial de produção de metano a partir de dejetos suíno é de $0,33 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MSO}$ considerando 60% de metano na mistura. Assim, pode-se calcular que o potencial de geração de biogás por quilograma (kg) de MSO é $0,55 \text{ Nm}^3$ - representado pela linha em azul - valor utilizado como referência para análise, já que o dado é obtido a partir de análise proveniente da suinocultura de terminação no Oeste do Paraná, referência na área no país.

Figura 21 - Geração de biogás por reator - teste 1

Fonte: Autor, 2019

Os reatores contendo inóculo com dejetos suíno e bagaço de laranja (I1DSB) foram os que obtiveram melhor desempenho, gerando em média $0,744 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg}^{-1} \text{ MSO}$, valor 30% superior ao potencial dado pelo Cibogás para a digestão do dejetos suíno. Em seguida os reatores contendo inóculo com carcaça de suíno (I1CAR) produziram, em média, $0,686 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg MSO}^{-1}$ o que também supera o potencial calculado com a referência do Centro de Energias Renováveis. Já os reatores contendo inóculo com dejetos suíno (I1DS) produziram em média $0,422 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg}^{-1} \text{ MSO}$, o que representa cerca de 76% do potencial de referência.

As análises de composição do gás do teste 1, feitas por cromatografia (CG), não estão demonstradas neste trabalho, pois apresentaram, em sua maioria, alto teor de nitrogênio devido ao baixo volume total gerado, devido à característica do inóculo e do substrato suíno que possuem baixo teor de matéria seca. Desta forma o biogás gerado ainda se encontrava diluído com o nitrogênio utilizado para purga dos reatores - procedimento realizado durante a montagem dos reatores para evitar presença de oxigênio, substância inibitória - não representado a proporção real dos gases gerados na biodigestão.

Com os resultados e análises obtidos no teste 1 após a biodigestão em reatores de bancada, pode-se entrever que há indício de que está havendo inibição do processo por amônia e que os microrganismos estão subalimentados com matéria orgânica, o que causa subnutrição e aumento do pH, prejudicando a biodigestão e, conseqüentemente, a produção de biogás.

Sendo que a mistura de dejetos suíno com bagaço de laranja foi a que apresentou melhor desempenho, com menor valor de pH final, maior volume de biogás gerado por quilograma de MSO e nitrogênio amoniacal em concentração abaixo da inibitória após o processo de digestão, se mostrando com potencial para melhorar o desempenho do processo de biodigestão de dejetos suíno, evidenciando a eficiência da codigestão. Este melhor desempenho pode ser atribuído às características do bagaço de laranja, que possui compostos ácidos, o que reduz seu pH, além de ser composto de lignina $2,9\pm 0,5\%$, holocelulose $33,1\pm 2,0\%$, celulose $38,5\pm 1,5\%$ e hemicelulose $24,0\pm 2,0\%$, que servem de fonte energética (MORAES e CRESTANI, 2018).

Considerando as análises realizadas e conclusões do teste 1, foi definido para o teste 2 uma análise exploratória visando esclarecer as incertezas. Para isso foi realizado teste com outra biomassa disponível na região para uso com codigestão, além do bagaço de laranja, combinado com a codigestão da vinhaça, que possui pH baixo, buscando contornar a alcalose característica da biodigestão do dejetos suíno. Além disso, visando renovar a biota do esterco suíno foi utilizada uma porcentagem de um inóculo industrial (inóculo Heinz), já testado com sucesso em outros experimentos.

Resultados do teste 2

Os teores de matéria seca, umidade e o pH das biomassas utilizadas na digestão anaeróbia do teste 2, realizado em duplicata, com os reatores de bancada, podem ser vistos na Tabela 15. Esses teores foram utilizados para calcular a proporção nos reatores e estabelecer a quantidade total de MSO por reator.

Tabela 15 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 2

Amostra	MS (%)	MSO (%)	MSI (%)	% MSO na MS	Umidade (%)	pH
Inóculo suíno	0,92	0,57	0,36	61,44	99,08	8,2
Inóculo heinz	6,99	5,88	1,12	84,05	93,01	6,9
Dejetos suíno	2,58	1,97	0,60	76,59	97,42	7,2
Torta de filtro	23,94	18,10	5,83	75,63	76,06	-
Vinhaça	0,90	0,59	0,32	64,79	99,10	3,3
Bagaço de laranja	13,25	12,81	0,44	96,68	86,75	4,7

Observa-se que o inóculo Heinz que é proveniente de processo industrial alimentício possui teor de MS 7,5 vezes maior que o inóculo suíno, apresentando teor de umidade de 93,01, além de pH 6,9, o que é indicativo que não há alcalinização do processo de biodigestão em que ele é produzido, como ocorre com o inóculo suíno com pH 8,2.

O bagaço de laranja apresentou característica semelhantes ao encontrado no teste 1. A torta de filtro apresentou o maior teor de MS, 23,94% e umidade 76,06%, alinhado ao que afirmam Rossetto e Santiago (2019), com umidade de cerca de 70%. A vinhaça apresentou menor teor de MS, 0,90%, e alto teor de umidade 99,10%, além de pH 3,3, um pouco abaixo da faixa encontrada por outros autores de 3,7 a 5,0 (MACHADO e FREIRE, 2009; SZYMANSKI, BALBINOT e SCHIRMER, 2010), o que é favorável para o processo, considerando que a vinhaça foi escolhida como biomassa para a codigestão especialmente por sua característica de baixo pH.

Os reatores foram montados de forma que tivessem a mesma quantidade de MSO de inóculo e de substrato, ou mistura de substratos, em uma proporção de 2:1, como pode ser visto na Tabela 16, totalizando 8,45 g de MSO por reator, exceto no caso do inóculo onde não é acrescido substrato, utilizado apenas para abater a produção do inóculo da produção de biogás ao final do experimento.

Tabela 16 - Composição dos reatores - teste 2

Reator	Massa de inóculo suíno (g)	Massa de inóculo Heinz (g)	Massa de dejetos suíno (g)	Massa de torta de filtro (g)	Massa de bagaço de laranja (g)	Massa de vinhaça (g)	Massa total de MSO (g)
INO2	817,47	13,92	-	-	-	-	5,46
I2DS	817,47	13,92	138,27	-	-	-	8,45
I2DSVT	817,47	13,92	117,53	2,03	-	6,99	8,45
I1DSVT	961,73	-	117,53	2,03	-	6,99	8,45
I2DSVB	817,47	13,92	117,53	-	2,87	6,99	8,45
I1DSVB	961,73	-	117,53	-	2,87	6,99	8,45

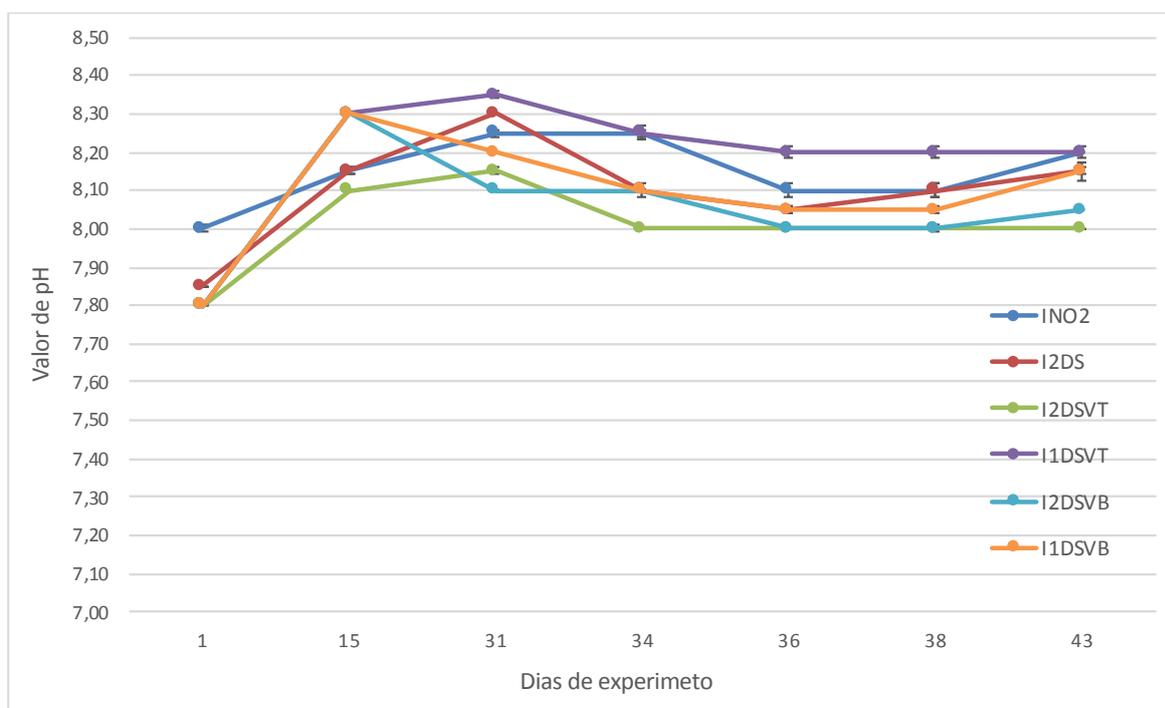
A Figura 22 traz a evolução da média do pH, com seus coeficientes de variação ao longo dos 43 dias de experimento. Observa-se que o pH dos reatores contendo substrato na data da partida se encontrava na faixa entre 7,8 e 7,9, sendo o reator INO2 com pH acima de 8,0, valores acima do que a FNR (2010) define como faixa de pH ótima para formação de metano, que se situa entre cerca de 7,0 e 7,5.

Nos reatores sem adição de inóculo Heinz – I1DSVT e I1DSVB, o pH subiu para 8,3 nos primeiros 15 dias, enquanto o aumento nos demais reatores foi menos acentuado. Assim como no teste 1, após um aumento no pH nos primeiros dias houve uma leve redução neste valor, exceto nos reatores contendo apenas inóculo (INO2), demonstrando que a digestão anaeróbia está passando pelo processo de acidogênese.

Aos 31 dias de experimento, quando os reatores se encontravam com pH acima de 8,1, foram adicionados 15 g de vinhaça em cada reator na tentativa de reduzir o pH e melhorar o desempenho da produção de gás, sem acrescentar uma quantidade significativa de MSO ao processo. Sendo então monitorados o pH e o volume de gás gerado a cada 2-3 dias, se acrescentando mais 15 g de vinhaça a cada medição. Porém, como pode ser visto na Figura 22 o pH se estabilizou, não apresentando redução significativa, como esperado, além de não haver mais geração significativa de gás, assim aos 43 dias o ensaio foi finalizado. Sendo que, ao final, os reatores que apresentaram menor pH, próximo a 8,0, foram os que possuíam mistura de inóculos e codigestão – I2DSVB e I2DSVT.

Desta forma observa-se que a quantidade de vinhaça acrescida não foi capaz de impedir a alcalose, embora tenha promovido a estabilização deste parâmetro, através do tamponamento do meio, após 34 dias de experimento.

Figura 22 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 2



Na Tabela 17 podem-se observar os teores de sólidos e umidade obtidos nos reatores após a finalização do experimento. As porcentagens de SOV após a biodigestão se encontram

com teores baixos, o que evidencia que a matéria orgânica disponível foi digerida durante o experimento, considerando que os reatores foram alimentados uma única vez.

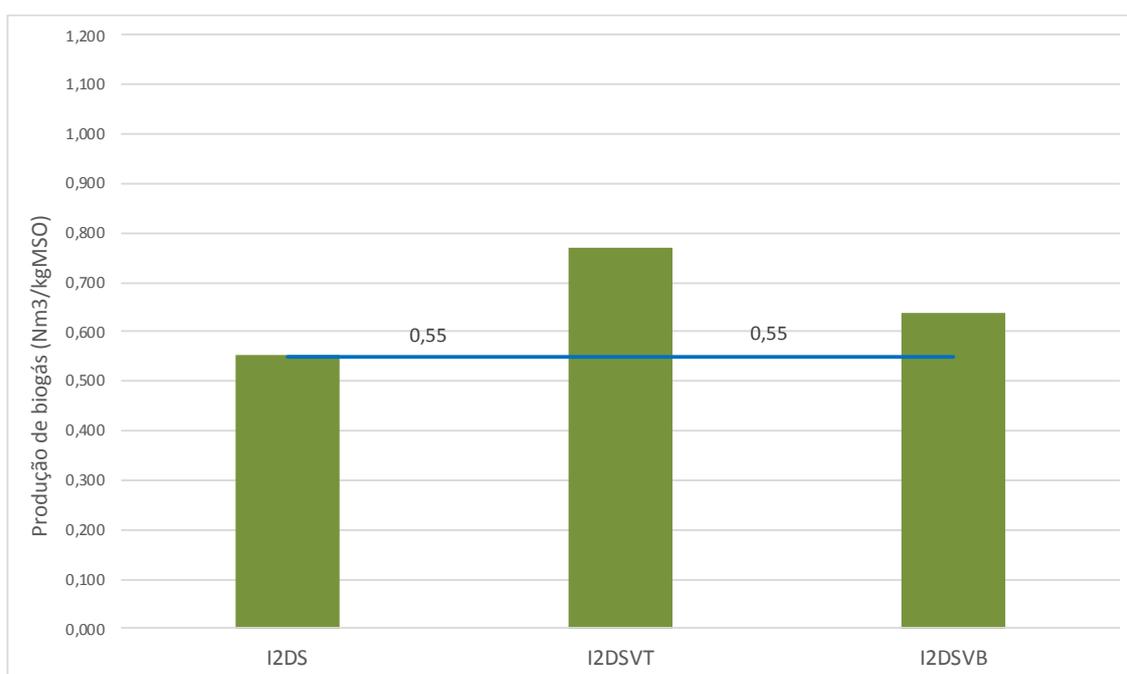
O teor de SOV no total de ST se mostrou menor que no teste 1, porém o teor de SOV também foi menor, demonstrando que a biodigestão neste experimento foi capaz de digerir uma porcentagem maior de matéria orgânica.

Tabela 17 - Caracterização final dos reatores - teste 2

Reator	ST (%)	SOV (%)	SI (%)	% SOV no ST	Umidade (%)
INO2	1,08	0,62	0,46	56,85	98,92
I2DS	1,31	0,77	0,55	58,33	98,69
I2DSVT	1,14	0,71	0,43	62,49	98,86
I1DSVT	0,90	0,55	0,35	60,82	99,10
I2DSVB	1,29	0,80	0,49	62,26	98,71
I1DSVB	1,39	0,83	0,57	59,19	98,61

A Figura 23 traz o potencial de produção de biogás – volume acumulado ao longo dos 43 dias de experimento – por MSO do(s) substrato(s). A linha azul representa a referência de $0,55 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MSO}$ calculada como no teste 1 e definido pelo Cibiogás (2018) como o potencial de geração de biogás para suinocultura medido a partir dos dados experimentais.

Figura 23 - Geração de biogás por reator - teste 2



No reator I2DS, com a adição de 15% de inóculo industrial (inóculo Heinz), a produção de biogás com o substrato de dejetos suínos alcançou o potencial definido pelo Cibiogás, gerando

0,553 Nm³ biogás.kg⁻¹ MSO, evidenciando que a renovação da biota promovida pelo novo inóculo foi capaz de aumentar a eficiência de produção de gás. Sendo que os reatores com codigestão tiveram desempenho ainda melhor, produzindo 0,771 Nm³ biogás.kg⁻¹ MSO superando em 40% a referência no reator com vinhaça e torta de filtro (I2DSVT) e em 16% no reator com vinhaça e bagaço de laranja (I2DSVB), ou seja gerando 0,637 Nm³ biogás.kg⁻¹ MSO, demonstrando que a codigestão dessas biomassas é eficiente para aumentar a produção de biogás a partir de substrato suíno.

Os resultados de produção de biogás dos reatores I1DSVB e I1DSVT não estão apresentados na Figura 23, pois ficaram subestimados devido a problemas operacionais com suas duplicatas de reatores/bags.

As análises de composição do gás do teste 2 feitas por cromatografia (CG) não estão demonstradas neste trabalho, pois apresentaram, em sua maioria, alto teor de nitrogênio devido ao baixo volume total gerado, devido à característica do inóculo e do substrato suíno que possuem baixo teor de matéria seca. Desta forma o biogás gerado ainda se encontrava diluído com o nitrogênio utilizado para purga dos reatores - procedimento realizado durante a montagem dos reatores para evitar presença de oxigênio, substância inibitória - não representado a proporção real dos gases gerados na biodigestão.

Após os resultados obtidos com a biodigestão nos reatores de bancada no teste 2, constatou-se que o uso do inóculo Heinz na proporção de 15% do total de inóculo foi capaz de renovar a biota e otimizar a produção de biogás. O uso de torta de filtro e bagaço de laranja na codigestão com dejetos suínos se mostrou favorável aumentando o rendimento na produção de biogás, sendo que os reatores I2DSVT foram os que apresentaram melhor resultado em relação a quantidade de biogás gerado por MSO.

O uso da vinhaça como codigestão na proporção utilizada não foi capaz de evitar alcalose no processo, logo a estratégia utilizada de adicionar mais vinhaça após 31 dias de experimento não foi eficiente, apesar de promover a estabilização do pH.

Após a realização das análises e conclusões do teste 2, decidiu-se utilizar para o teste 3 a vinhaça como aditivo para redução de pH, codigerido com as mesmas biomassas já testadas e a adição de inóculo Heinz, além de testar o controle de pH com vinhaça isoladamente para o substrato suíno, ou seja, sem adição de outro inóculo e codigestão. Para contornar o problema identificado de baixo volume de gás total gerado impedindo a análise de composição, para o teste 3 utilizou-se a proporção de 1:1 de inóculo e substrato.

Resultados do teste 3

A Tabela 18 traz os teores de matéria seca, umidade e o pH das biomassas utilizadas na digestão anaeróbia do teste 3, realizado em triplicata. Esses teores foram utilizados para calcular a proporção nos reatores e estabelecer a quantidade total de MSO por reator.

Tabela 18 - Caracterização inicial das amostras para montagem dos reatores - teste 3

Amostra	MS (%)	MSO (%)	MSI (%)	% MSO na MS	Umidade (%)	pH
Inóculo suíno	1,15	0,76	0,39	66,06	98,85	8,0
Inóculo Heinz	8,03	6,80	1,23	84,70	91,97	7,0
Dejeto suíno	2,09	1,60	0,50	76,18	97,91	6,4
Bagaço de laranja	11,92	11,47	0,45	96,19	88,08	4,7
Torta de filtro	23,94	18,10	5,83	75,63	76,06	-
Vinhaça	0,90	0,59	0,32	64,79	99,10	3,3

Como constatado no teste 2 o inóculo Heinz, que é proveniente de processo industrial alimentício, possui teor de MS em torno de sete vezes maior que o inóculo suíno, apresentando teor de umidade de 91,97% e pH 7,0. O inóculo suíno apresentou teor de umidade de 98,85% e pH 8,0. Já o dejeto suíno possui teor de umidade de 97,91%, teor de MSO de 1,60% e pH 6,4. O bagaço de laranja apresentou característica próximas às encontradas nos testes 1 e 2. A torta de filtro e a vinhaça utilizadas foram as mesmas amostras usadas para o teste 2, por isso os dados das análises foram aproveitados.

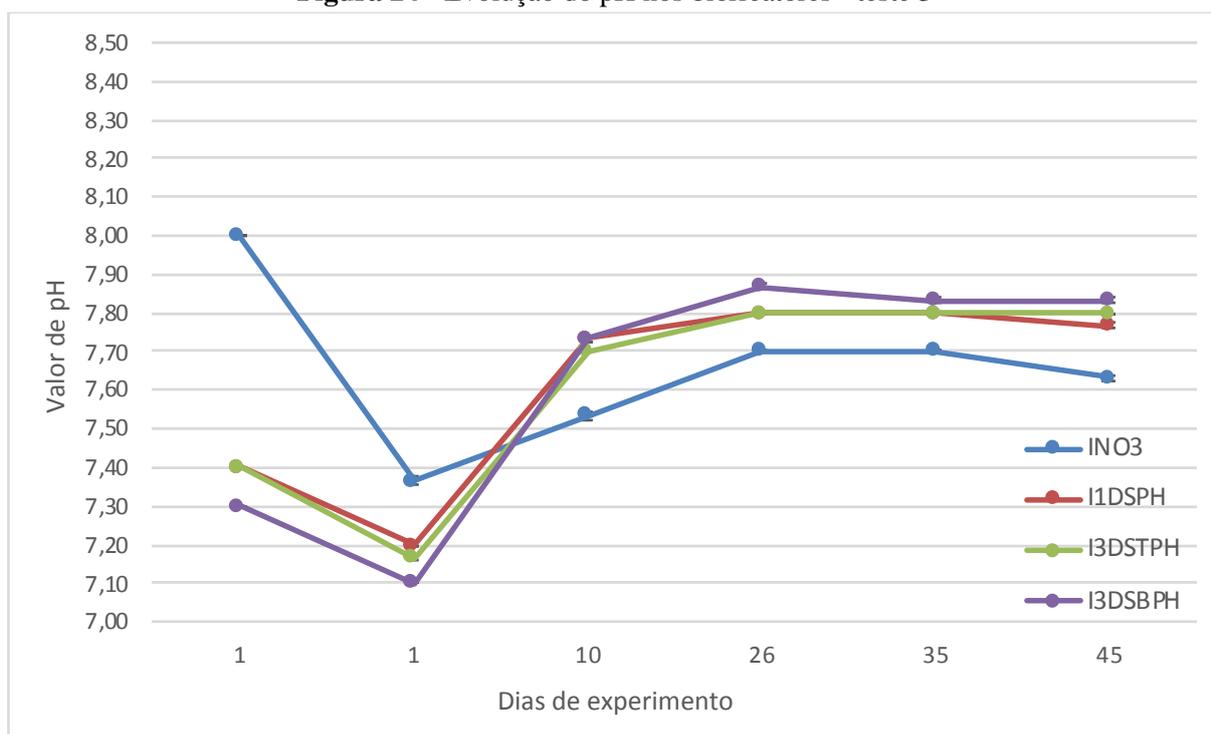
Os reatores foram montados de forma que tivessem a mesma quantidade de MSO de inóculo e de substrato, ou mistura de substratos, em uma proporção de 1:1, como pode ser visto na Tabela 19, totalizando 11,35 g de MSO por reator, exceto no caso do inóculo onde não é acrescido substrato, já que este é utilizado apenas para obter a diferença da produção de biogás ao final do experimento. Ao final da montagem foram acrescentados 200 g de massa de vinhaça, conforme a capacidade do reator, para os reatores contendo substrato, e 400 g de vinhaça para os reatores apenas com inóculo.

Tabela 19 - Composição dos reatores - teste 3

Reator	Massa de inóculo suíno (g)	Massa de inóculo Heinz (g)	Massa de dejeito suíno (g)	Massa de torta de filtro (g)	Massa de bagaço de laranja (g)	Massa de vinhaça (g)	Massa total de MSO (g)
INO3	632,631	12,51	-	-	-	400	5,68
I1DSPH	744,272	-	355,73	-	-	200	11,35
I3DSTPH	632,631	12,51	320,16	3,14	-	200	11,35
I3DSBPH	632,631	12,51	320,16	-	4,95	200	11,35

Considerando que a FNR (2010) define que a faixa de pH ótima para formação de metano é entre cerca de 7,0 e 7,5, após a montagem dos reatores, antes de se iniciar o experimento, os reatores foram aditivados com vinhaça até o pH estar próximo ao limite inferior da faixa ótima, ou seja 7,0, respeitando a capacidade total do reator. A Figura 24 traz os valores médios de pH antes da adição da vinhaça, no dia 1, e após a adição, ainda no dia 1, e posteriormente a evolução desse parâmetro até os 45 dias, quando o teste foi finalizado.

Observa-se que o pH aumentou em todos os reatores após 10 dias, ficando entre 7,7 e 7,8 nos reatores com substrato, ocorrendo de forma menos acentuada no inóculo – saindo de 7,4 para 7,5. Até o dia 26 ainda houve um leve acréscimo no parâmetro em todos os reatores, havendo a partir de então uma estabilização, permanecendo durante todo processo de biodigestão abaixo de 7,9, o que não ocorreu em nenhum reator dos testes 1 e 2, demonstrando que o uso da vinhaça como aditivo foi eficiente para conter o aumento do pH.

Figura 24 - Evolução do pH nos biorreatores - teste 3

A Tabela 20 expressa as concentrações de nitrogênio total e amoniacal encontradas nos reatores com substrato ao final do teste 3. Embora o nitrogênio seja essencial para o processo de biodigestão, há evidências de que elevadas concentrações do nutriente no substrato inibem a metanogênese. Na Tabela 20 observa-se que a concentração de nitrogênio amoniacal se encontra mais de seis vezes abaixo desse valor, ou seja, não há indícios de que está havendo inibição por amônia, diferente do que foi visto no teste 1, conforme demonstrado na Tabela 13.

Comparando-se os reatores I1DS (teste 1) e I1DSPH, que se diferenciam pela adição de vinhaça, temos uma concentração quase oito vezes maior no reator sem vinhaça. Considerando que o reator I1DS apresentou pH 8,13 e o reator I1DSPH apresentou pH de 7,77 e que segundo a FNR (2010) a elevação do pH de 6,5 para 8,0 leva a um aumento de 30 vezes a concentração de amônia livre, considerando essa uma relação linear, o resultado encontrado deveria ser 7,2 vezes menor, ou seja, está de acordo com o esperado, demonstrando que o uso da vinhaça como aditivo foi capaz de impedir a inibição do processo por amônia.

Tabela 20 - Concentração de nitrogênio amoniacal e total – teste 3

Amostra	Nitrogênio Amoniacal Kjeldahl (mg.L⁻¹)	Nitrogênio Total (mg.L⁻¹)
I1DSPH	442	450
I3DSTPH	422	436
I3DSBPH	439	470

Os valores de nitrogênio total e amoniacal se encontram bastante semelhantes, o que é indício que o nitrogênio orgânico foi consumido no processo sendo transformado pelas bactérias em nitrogênio gasoso.

Na Tabela 21 encontram-se os teores de sólidos e umidade obtidos nos reatores após a finalização do experimento. As porcentagens de SOV após a biodigestão se encontram com teores baixos o que evidencia que a matéria orgânica disponível foi digerida durante o experimento, considerando que os reatores foram alimentados uma única vez.

Tabela 21 - Caracterização final dos reatores - teste 3

Reator	ST (%)	SOV (%)	SI (%)	% SOV no ST	Umidade (%)
INO3	0,56	0,42	0,15	74,27	99,44
I1DSPH	0,87	0,70	0,17	80,17	99,13
I3DSTPH	1,55	1,13	0,42	72,65	98,45
I3DSBPH	0,74	0,67	0,06	91,31	99,26

Foram realizadas análises das concentrações de cobre, ferro e zinco dos biorreatores após a finalização do experimento, com o objetivo de verificar se esses micronutrientes, que são inseridos no processo através da alimentação dos animais, estão em concentração ideal ou em concentração tóxica para as arqueas na digestão anaeróbia. Os resultados estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Concentração de Zn, Fe e Cu por reator – teste 3

Amostra	Metal		
	Cu (mg.kg ⁻¹ de MS)	Fe (mg.kg ⁻¹ de MS)	Zn (mg.kg ⁻¹ de MS)
INO3	1970	1681	1096
I1DSPH	1884	1632	1302
I3DSTPH	1267	3092	842
I3DSBPH	1071	1247	719
Vinhaça	14	728	28
Referência (FNR, 2010)	10 - 80 (ideal 40)	750 - 5000 (ideal 2400)	30 - 400 (ideal 200)

Pode-se observar na Tabela 22 que as concentrações de zinco e cobre, que são metais considerados micronutrientes nas concentrações ideais, estão bem acima dos valores considerados tóxicos para as arqueas metanogênicas em todos os reatores, o que acarreta a queda na produção de gás. A baixa concentração desses metais na vinhaça demonstra que não são provenientes desse substrato e sim do substrato da suinocultura. O ferro se encontra em concentrações dentro da faixa de referência para o processo não interferindo de forma negativa na geração de biogás.

A Tabela 23 traz a concentração de nutrientes que influenciam o processo metabólico dos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia.

Tabela 23 - Concentração de nutrientes – teste 3

Amostra	Nutriente (mg/L ⁻¹ amostra)								
	Cálcio (Ca)	Cobalto (Co)	Magnésio (Mg)	Manganes (Mn)	Molibdênio (Mo)	Níquel (Ni)	Enxofre (S)	Selênio (Se)	Vanádio (V)
INO3	84,36	<LD	81,83	0,222	<LD	0,073	124,81	<LD	<LD
I1DSPH	246,39	<LD	128,97	0,770	<LD	0,128	66,66	<LD	<LD
I3DSTPH	134,74	<LD	79,57	0,252	<LD	0,052	67,55	<LD	<LD
I3DSBPH	110,62	<LD	70,02	0,204	<LD	0,075	74,98	<LD	<LD
Vinhaça	91,56	<LD	43,53	0,261	<LD	0,022	756,88	<LD	<LD

*<LD valor abaixo do limite de detecção

O enxofre é considerado um macronutriente essencial ao processo e deve estar presente em concentração suficiente para a formação de enzimas, pois os aminoácidos têm em sua composição o enxofre. Porém os compostos de enxofre podem causar problemas para o processo anaeróbio, pois causam a precipitação de nutrientes essenciais em níveis traços como ferro, níquel, cobre e molibdênio, que são insolúveis em baixos potenciais redox (precipitação como sulfeto) (FNR, 2010; KUNZ et al., 2019).

Nos reatores foram encontradas concentrações de enxofre entre 74,98 mg.L⁻¹, no reator I3DSBPH e 124,8 mg.L⁻¹, no reator INO3, valores abaixo do valor característico para dejetos suíno encontrado pela FNR (2010) de 451,94 mg.L⁻¹, demonstrando que o enxofre disponível foi em sua maioria transformado em H₂S, que é gasoso. Sendo que a concentração se encontra menor nos reatores com substrato, onde houve produção significativa de biogás. A concentração de 756,88 mg.L⁻¹ de enxofre na vinhaça mostra que ela foi uma fonte de enxofre no teste.

Além dos macronutrientes, a disponibilidade de micronutrientes, que são minerais que ocorrem em concentrações muito baixas, é essencial para a sobrevivência dos microrganismos. Arqueas metanogênicas necessitam de cobalto (Co), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e selênio (Se), sendo cofatores em reações essenciais no metabolismo. Além disso, magnésio (Mg), ferro (Fe) e manganês (Mn) são micronutrientes importantes para o transporte de elétrons e a função de determinadas enzimas (FNR, 2010). Segundo KUNZ et al. (2019) os íons de enxofre, potássio, cálcio, magnésio, cloro e sulfato são necessários para o bom funcionamento da digestão anaeróbia. Elementos traços como ferro, cobre, zinco, magnésio, molibdênio e vanádio são importantes para o crescimento celular.

Não foram encontradas concentrações acima do limite de detecção do aparelho utilizado para varredura dos nutrientes em nenhum dos reatores dos micronutrientes Co, Mo, Se e V, incluindo na vinhaça, desta forma ela não é um aditivo capaz de fornecer esses micronutrientes ao processo. As concentrações de cálcio se encontraram entre 84,36 mg.L⁻¹, para o reator INO3 e 246,39 mg.L⁻¹ para o reator I1DSPH, abaixo do valor característico para o dejetos suíno encontrado pela FNR (2010) de 2535,32 mg.L⁻¹, assim como o magnésio cujo valor característico é de 1.433 mg.L⁻¹ e as concentrações nos reatores estão entre 70,02 mg.L⁻¹, no reator I3DSBPH e 128,97 mg.L⁻¹, no reator I1DSPH.

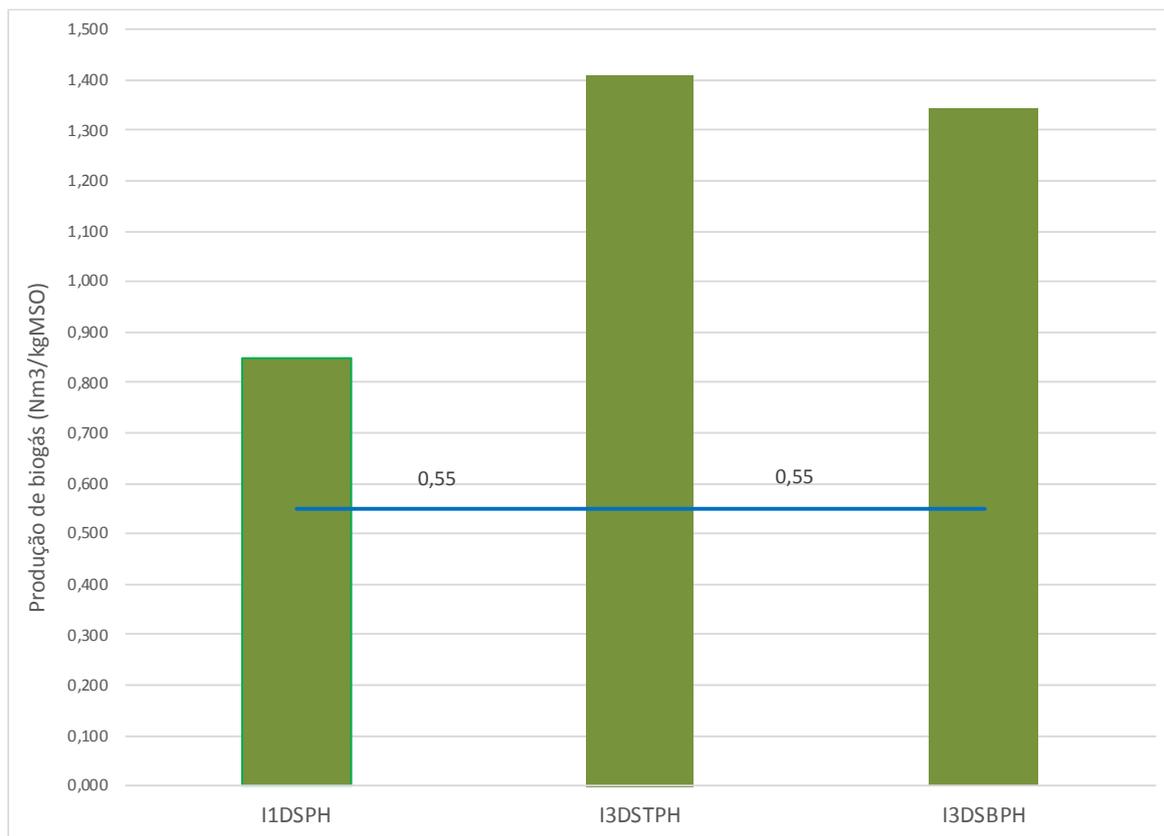
A concentração de manganês e níquel, de acordo com diferentes bibliografias encontradas pela FNR (2010) está entre 0,005 e 50 mg.L⁻¹, assim em todos os reatores a concentração desses nutrientes se encontra dentro da faixa de referência.

Segundo FNR (2010) usinas que operam exclusivamente com biomassa estão sujeitas a distúrbios por falta de nutrientes no processo, esses distúrbios se manifestam pela queda na produção de gás principalmente pelo aumento da acidez. Desta forma, esse fenômeno raramente

é observado em usinas alimentadas por esterco líquido. A demanda de micronutrientes é geralmente atendida na maioria das usinas de biogás agrícolas, principalmente pelo uso de dejetos animais. Os mecanismos precisos por trás desse fato e as substâncias efetivamente limitantes, no entanto, ainda não puderam ser identificados de forma precisa. Ao comparar diferentes fontes bibliográficas se evidencia grande amplitude de variação dos micronutrientes considerados essenciais, sendo que o efeito inibitório das diferentes substâncias depende de diversos fatores e dificilmente pode-se determinar limites absolutos. Sendo assim, neste estudo não se pode afirmar que a ausência de alguns micronutrientes ou sua baixa concentração ao final do teste de digestão anaeróbia foram capazes de reduzir a produção de biogás.

Foi realizada análise para detectar presença de fenol na digestão anaeróbia, devido às características da vinhaça. Nos EUA, de acordo com a United States Environmental Protection Agency (USEPA), alguns poluentes orgânicos incluindo pentaclorofenol e fenol foram encontrados em efluentes de algumas usinas de cana-de-açúcar, porém a fonte destes compostos não foi descoberta. No entanto, não se identificou esse contaminante, sendo assim é possível afirmar não há inibição pela presença de fenol.

A Figura 25 mostra o volume acumulado ao longo dos 45 dias de experimento por MSO do(s) substrato(s), ou seja, o potencial de produção de biogás por MSO do substrato. A linha azul representa a referência de $0,55 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ MSO}$ calculado como no teste 1 e definido pelo Cibogás (2018) como o potencial de geração de biogás para suinocultura, medido a partir dos dados experimentais.

Figura 25 - Geração de biogás por reator - teste 3

O reator contendo apenas inóculo suíno e dejetos suínos com aditivo de vinhaça (I1DSPH) apresentou desempenho 54% superior à referência do Cibiogás (2018), gerando $0,850 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg}^{-1} \text{ MSO}$. Os reatores contendo também inóculo Heinz e codigestão com bagaço e torta, além do aditivo com vinhaça, apresentaram desempenho bem superior à referência, superando em 256% – produzindo $1,409 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg}^{-1} \text{ MSO}$ – para o reator I3DSTPH e em 244% – produzindo $1,342 \text{ Nm}^3 \text{ biogás.kg}^{-1} \text{ MSO}$ – para o reator I3DSBPH.

Os teores de gás gerados nos reatores podem ser vistos na Tabela 24.

Tabela 24 - Média dos componentes da mistura de biogás por reator – teste 3

Componente	Médias (%vol)			Coeficiente de variação
	I3DSBPH	I3DSTPH	I1DSPH	
Metano	77,40	73,12	69,32	$\pm 0,055$
Dióxido de carbono	19,93	21,48	25,32	$\pm 0,125$
Nitrogênio	2,67	5,40	5,36	$\pm 0,350$

Das combinações testadas, a que apresentou maior teor de metano, que é o gás de interesse no processo, foi a I3DSBPH, com teor de 77,40%, seguido da I3DSTPH com 73,12% e

por fim o reator I1DSPH com teor de 69,32%, sendo assim considerados biogás de alta qualidade pelo teor de metano, já que a FNR (2010) afirma que a mistura gerada pode conter teor de metano de 50% a 75% e que o Cibiogás (2018) encontrou teores de 60% a partir do monitoramento das unidades com processo de biodigestão de dejetos suínos de animais terminação no Oeste do Paraná.

O teor de metano, de 69,32%, encontrado para o reator I1DSPH, é próximo ao encontrado na propriedade de onde foram coletados o inóculo e o substrato suíno (média de 69,92%), apresentado na Tabela 10, o que mostra que o uso de vinhaça como aditivo, embora tenha aumentado a produção de biogás, não influenciou no teor de metano.

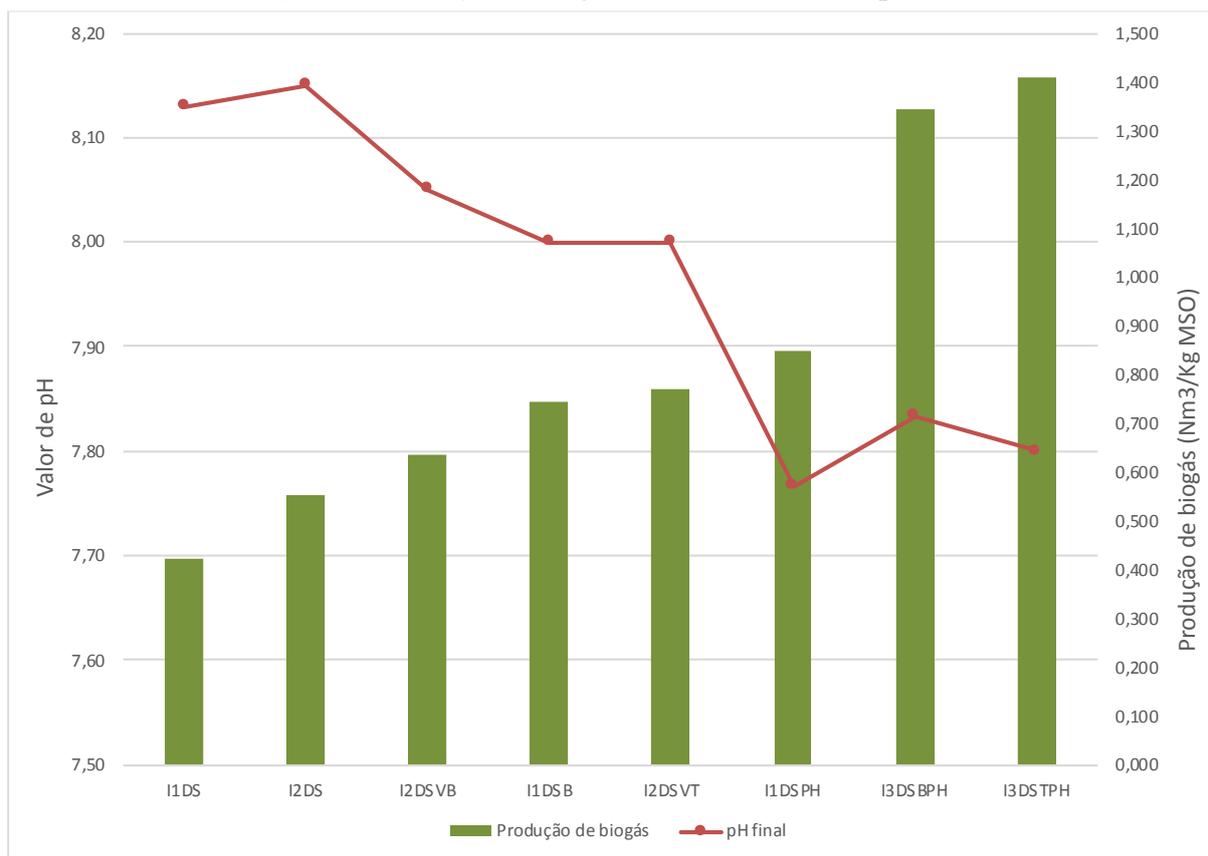
O reator I3DSTPH, embora tenha gerado um volume de biogás maior por MSO que o I3DSBPH, apresentou teor de metano inferior ao segundo, sendo assim, foi calculada a geração metano por MSO temos $1,030 \text{ Nm}^3 \text{ metano.kg}^{-1} \text{ MSO}$ para I3DSTPH e $1,038 \text{ Nm}^3 \text{ metano.kg}^{-1} \text{ MSO}$ para I3DSBPH, é possível afirmar que ambos tiveram desempenho semelhante, considerando que o objetivo principal da biodigestão do dejetos suíno em propriedades rurais é o uso do gás metano para conversão em energia elétrica.

Os resultados encontrados no teste 3 demonstram que a codigestão de bagaço de laranja e torta de filtro é eficiente para aumentar a produção de biogás a partir de substrato suíno. O uso da vinhaça como aditivo foi eficiente para evitar a geração de alcalose e o acúmulo de nitrogênio amoniacal e total, permanecendo abaixo da faixa inibitória e evitando inibição por amônia. A combinação desses dois fatores permitiu um desempenho 200% superior ao encontrado pelo Cibiogás (2018) a partir do monitoramento das unidades com processo de biodigestão de dejetos suínos de animais em terminação no Oeste do Paraná. Embora a concentração de Zn e Cu ainda se encontre dentro da faixa inibitória nos reatores, o que pode influenciar negativamente a produção do biogás.

3.2.3.3 Análise comparativa da geração de biogás nas diferentes condições

A Figura 26 mostra a geração média de biogás por MSO dos testes realizados junto com o pH medido ao final do processo.

O reator I1DS, que reproduz a situação encontrada na granja estudada, foi o que apresentou menor produção de biogás por MSO. A mistura na proporção de 15% de um inóculo industrial (inóculo Heinz) no reator I2DS, que promoveu a renovação da biota, foi capaz de aumentar a produção em cerca de 31%, e o reator I1DSPH com uso de vinhaça como aditivo, mantendo uso do inóculo suíno e do substrato da granja, apresentou o dobro de geração de biogás por MSO, dando indícios da importância do pH nesse processo.

Figura 26 - Geração de biogás dos biorreatores com pH final

Os reatores I2DSVB, I1DSB e I2DSVT apresentaram resultados de 50% a 80% melhores que o I1DS, demonstrando que o uso da codigestão com bagaço de laranja e torta de filtro foi capaz de promover melhoria na produção de biogás. Sendo os melhores resultados de produção de biogás por MSO nos reatores onde houve uso do recurso da codigestão combinado com a mistura de inóculo e o controle do pH através do uso de vinhaça como aditivo, nos reatores I3DSBPH e I3DSTPH, superando em mais de 200% a produção de biogás do reator I1DS. Embora a produção de biogás tenha sido maior em I3DSTPH, considerando o teor de metano apresentado na Tabela 24, o desempenho de ambos é considerado semelhante já que a quantidade de metano, que é o gás de interesse no processo, gerado foi praticamente a mesma.

Lansing et al. (2010), em levantamento feito a partir de resultados compilados, mostra ser frequente a alcalinidade dos dejetos oriundos de produção animal, o que pode ser considerada benéfica, já que apresentam resistência para a acidificação. No entanto, as arqueas metanogênicas são sensíveis às mudanças de pH e elevadas concentrações de amônia, que é uma característica de substratos agropecuários. E apesar da amônia ser um nutriente essencial para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, também pode ser tóxica em concentrações elevadas (DE PRÁ et al., 2013). A linha vermelha na Figura 26 traz o valor de pH medido ao final do processo até o esgotamento da produção de gás, desta forma pode-se observar que os reatores com melhor desempenho são os que finalizaram o processo com menor pH e vice-versa, o que evidencia a importância deste parâmetro no resultado da geração de biogás, considerando que

o aumento do pH causa acúmulo de amônia e inibição do processo de digestão anaeróbia, como visto nos resultados de concentração de amônia onde no teste 1 as concentrações se encontravam dentro ou próximo à faixa de inibição definida pela FNR (2010) como sendo entre 3.000 e 3.500 mg.L⁻¹, sendo que para o teste 3, que apresentou os melhores resultados de geração de biogás a concentração de amônia foi cerca de oito vezes menor.

3.2.3.4 Estimativa do potencial de produção de biogás da região Sudoeste de Goiás

Foram realizados cálculos teóricos do potencial de geração de biogás em um ano para a situação semelhante à atual, encontrada na granja estudada – linha 1 da Tabela 25 – e considerando a melhor condição após aplicação das melhorias testadas – linha 2 da Tabela 25, já constatado que o processo de manejo dos animais no Sudoeste de Goiás é semelhante e que em 2019 há na região 160 granjas de criação de suínos em terminação, totalizando 664.000 animais. Considerando que na região há 180 biodigestores instalados ou em processo de instalação, esse potencial pode ser aproveitado (COOPERSAG, 2019). Para isso, a Tabela 25 traz o volume de dejetos produzidos por animal na categoria de terminação definida pelo Cibiogás (2018) e a média de porcentagem de MSO identificado no diagnóstico e nos três testes realizados neste estudo, que é 2,14%, assim pode-se calcular o volume de MSO produzido por animal em um dia. Considerando que foi encontrado o potencial de produção de biogás do dejetos suíno de 0,422 Nm³ biogás. Kg MSO⁻¹, como visto na Figura 26, temos que o potencial de produção da região Sudoeste de Goiás é de 27.307,83 Nm³ biogás.dia⁻¹ ou 9.967.361,14 Nm³ de biogás.ano⁻¹. Sendo que se forem aplicadas as adaptações na melhor condição encontrada no reator I3DSTPH temos que o potencial de produção de biogás é de 1,409 Nm³ biogás. Kg MSO⁻¹, como visto na Figura 26, assim o potencial de produção da região Sudoeste de Goiás passa a ser de 91.177,12 Nm³ de biogás.dia⁻¹ ou 32.823.763,35 Nm³ biogás.ano⁻¹.

Tabela 25 – Valores referência para cálculo do potencial de biogás da região Sudoeste do Estado de Goiás

Volume de dejetos (Kg/animal/dia)*	Média de MSO (%)	Volume de MSO (kg/animal/dia)	Potencial de biogás (Nm ³ biogás. Kg MSO ⁻¹)	Quantidade de animais na região Sudoeste de Goiás**	Potencial de biogás da região (Nm ³ de biogás.dia ⁻¹)	Potencial de biogás da região (Nm ³ de biogás.ano ⁻¹)
4,55	2,14	0,0975	0,422	664.000	27.307,83	9.967.361,15
4,55	2,14	0,0975	1,409	664.000	91.177,12	32.823.763,35

*CibioGas, 2018. **Coopersag, 2019

Utilizando dados nominais da empresa ER-BR Soluções em Energia e Biometano que produz geradores movidos a biogás, considerando o motor-gerador MWM 30KVA ajustado para concentração de 65% de metano temos que 1 Nm³ produz 1,43 kWh, mesma equivalência de produção energética encontrada por Coldebella et al. (2008), tem-se um potencial na região de gerar 14.253,33 MWh com biogás em um ano a partir de dejetos de suínos e se aplicadas com sucesso as melhorias testadas 4.6937,98 MWh em um ano.

Tendo que o custo total de 1 kWh, incluindo impostos e taxas, para uma residência não enquadrada como de baixa renda cobrada pela Enel na capital do Estado de Goiás é R\$ 1,15, tem-se um potencial de economia entre 16 milhões até aproximadamente 54 milhões.

4 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e análises obtidos durante diagnóstico em uma propriedade na Região do Sudoeste Goiano demonstraram que o processo de biodigestão precisa ser monitorado em seus diversos parâmetros visando melhorar sua produtividade. Há forte indício que o biodigestor está sendo subalimentado com matéria orgânica, pois o teor de MS no substrato é de 3,93%, sendo que o valor de referência é 6% para MS. Consequentemente o teor de MSO no digestato é bem inferior ao que a literatura determina: 4%-7% de MSO, sendo o valor médio encontrado de 0,97%, o que causa insuficiência de substrato para os microrganismos. Fato reforçado pela análise de FOS/TAC, que constatou índice de 0,2 e 0,1, enquanto o ideal seria entre 0,3-0,4, o que ocasiona aumento do pH de 7,0 para 8,2 em média, prejudicando a produção de biogás. Além disso, a concentração de cobre e zinco se encontra na faixa inibitória das arqueas metanogênicas: teor de zinco $1.389,5 \text{ mgkg}^{-1}$ de MS; teor de cobre 853 mgkg^{-1} de MS.

Os testes realizados visando contornar os fatores que influenciavam a baixa produção de biogás identificada demonstraram que a codigestão é eficiente para aumentar a disponibilidade de nutrientes, sendo que houve aumento na produção de biogás de 50 a 80% nos biorreatores I2DSVB, I1DSB e I2DSVT, sendo que os melhores resultados de produção de biogás por MSO foram encontrados para os biorreatores I3DSBPH e I3DSTPH onde foi combinado o uso de adição de outro inóculo para renovação da biota, o uso da codigestão e adição de vinhaça para não alcalinização do meio, o que se mostrou um recurso eficiente, já que o pH ao final do teste ficou abaixo de 7,9 e a concentração de nitrogênio amoniacal ficou abaixo da faixa de inibição dada pela FNR (2010), sendo quase oito vezes menor que os valores encontrados ao final do teste com os reatores I1DS e I1DSB, resultando em uma produção de biogás 200% maior que o reator I1DS. Além disso, a qualidade do gás produzido nos reatores I1DSPH, I3DSBPH e I3DSTPH é alta, com teor de metano médio acima de 70%.

No entanto, ainda foram encontradas concentrações de cobre e zinco acima da faixa inibitória para arqueas metanogênicas, sendo o teor de cobre entre 1.071 e 1.970 mg.kg^{-1} de MS e de zinco entre 719 e 1.302 mg.kg^{-1} de MS. Assim sendo, novas pesquisas podem ser realizadas visando solucionar a questão, evitando a entrada desses no biodigestor, já que o acúmulo desse metais por deposição ao longo do tempo pode causar colapso dos microrganismos e inibir completamente o processo de digestão anaeróbia. Como sugestão para trabalhos futuros temos ainda um estudo mais aprofundado sobre os filtros de ácido sulfídrico (H_2S) e melhorias aplicáveis, além de verificar outras proporções de substratos para codigestão com dejetos suíno.

A região Sudoeste de Goiás possui potencial de produção de energia elétrica de 14.253,33 MWh por ano se todo volume de dejetos suíno gerado for tratado por digestão anaeróbia em biodigestores de lagoa coberta, porém caso aplicadas as melhorias estudadas no biorreator I3DSTPH esse potencial pode chegar a 46.937,98 MWh em um ano.

5 REFERÊNCIAS

ABALDEA, A. R.; FLOTASTSC, X.; FERNÁNDEZA, B. *Optimization of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine*, Waste Management, 2016.

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M; ABBASI, S. A. Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 16, n. 5, p. 3228- 3242, 2012.

ABCS; MAPA; CONCÓRDIA; EMBRAPA SUÍNOS E AVES. *Manual Brasileiro de Boas Práticas Agropecuárias na Produção de Suínos* - Revisão técnica. Brasília, DF, 2011. 140 p.

ABIOGAS (Associação Brasileira de Biogás e Biometano). Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano - PNBB. v. 01. São Paulo – SP. Nov, 2015.

AGEITEC (Agência Embrapa de Informação Tecnológica). *Agroenergia – biogás*. Brasília - DF, 2017. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>> Acesso em: 17 mai. 2018.

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KOTTENER, M.; FINSTRWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. *Biogas Handbook*. 978-87-992962-0-0. 2008.

ALBUQUERQUE, L. S.; ARAÚJO, J. C. S. Produção de biogás por co-digestão utilizando uma mistura de dejetos bovinos e casca de café conilon. *Brazilian Journal of Production Engineering*. Editora CEUNES/DETEC. São Mateus, Vol. 2, n. 3, p. 44-54, 2016.

ALEXANDRINO, A. M. Aproveitamento do resíduo de laranja para a produção de enzimas lignocelulolíticas por *Pleurotostreatus*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. v. 27 n.2, 2007.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). *Atlas de energia elétrica no Brasil*. 2. Ed. Brasília- DF: ANEEL, Cap. 6. 2005. 243 p.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Fonte de Origem: Biomassa. Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação. *Banco de Informações de Geradores*. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse_fn1.cfm?origem=2&Combustivel=Biomassa&fase=3> Acesso em: 26 set. 2018.

ANGELIDAKI, I; AHRING, L.E.B.K. *Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent*. *Water Science and Technology*. v.36, n.6-7, p.263–270, Elsevier:1997.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. New York: APHA, WWA, WPCR, 20 ed. 2012.

BAUNGRATZ, K. L. *Produção de biogás a partir de biomassa residual*. *Acta Iguazu*, Cascavel, v.2, n. 3, p. 30-39, 2013.

BEIL, M.; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) *The biogas handbook: science, production and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 342–377.

BOHRZ, G. I. *Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos*. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2010.

BOROWSKI S.; DOMAŃSKI J.; WEATHERLEY L. *Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge*. *Waste Management*, v.34, no 2 p. 513-21, 2014.

CAILLOT, V. A.; SOUZA, J.; SILVA, C. B; SECCO C.; FRANCISCO, A. C. *Otimização da produção de metano através da codigestão anaeróbica dos resíduos da suinocultura*. In: International workshop advances in cleaner production, 6. São Paulo, SP. Maio, 2017.

CANAL RURAL. Resíduos agropecuários: passada onda da biodigestão no Brasil, tecnologia resiste na suinocultura. Série especial. Mai. 2012 Disponível em: <<https://canalrural.uol.com.br/noticias/residuos-agropecuarios-passada-onda-biodigestao-brasil-tecnologia-resiste-suinocultura-38558/>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

CASTANHO, D., S.; HARRUDA, H., J. *Biodigestores*. VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, PR, Brasil, 2008.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. *Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica*. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 5, p. 831-844, set-out. 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, 1997. 245 p.

CIBIOGÁS (Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás). *Nota Técnica: N° 001/2018 – Produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos suínos em fase de terminação no Oeste do Paraná*. Foz do Iguaçu, PR, 2018.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; FERRI, P.; KOLLING, E. M. *Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura*. *Informe Gepec*, v. 12, n. 2, p. 44-55, 2008.

COOPERSAG (Cooperativa de Suinocultores e Avicultores de Goiás). Disponível em: <<http://www.coopersag.com.br/noticias>> Acesso em: 17 ago. 2019.

DE PRÁ, M. C. et al. Simultaneous removal of TOC and TSS in swine wastewater using the partial nitritation process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 88, n. 9, 2013. DOI: 10.1002/jctb.3803.

DICORATO, M.; FORTE, G.; TROVATO, M. *Environmental-constrained energy planning using energy-efficiency and distributed-generation facilities*, Renewable Energy, Vol. 33, p. 1297–1313, 2008.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. *Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos*. Porto Alegre: Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves – EMBRAPA e Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMATER/RS, 2002. 31 p. Boletim Informativo de Pesquisa.

DOBRE, P.; NICOLAE, F.; FLORENTINA MATEI, F. *Main factors affecting biogás production - an overview*. Romanian Biotechnological Letters. p. 9283-9296, 2014.

EPE (Empresa de pesquisa energética) e MME (Ministério de Minas e Energia). *Balanço energético nacional 2017* – relatório síntese ano base 2016. Rio de Janeiro – RJ, Jun. 2017.

EPE (Empresa de pesquisa energética) e MME (Ministério de Minas e Energia). *Balança Energético Nacional 2018* - BEN 2018. Relatório síntese – ano base 2017. Rio de Janeiro- RJ, 2018. 62 p.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). *Informe à imprensa: Demanda da energia elétrica: 10 anos*, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20110222_2.pdf> Acesso em: 17 mai. 2018.

FAEG (Federação de Agricultura e Pecuária de Goiás). *Cana-de-açúcar em Goiás tem cenário positivo na safra 2017/18*. Notícias. Jun, 2018.

FEAM (Fundação Estadual de Meio Ambiente). *Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria*, Minas Gerais, 2015.

FERNANDES, D. M. *Biomassa e biogás da suinocultura*. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - PR, 2012.

FERREIRA, L.; DUARTE, E.; FIGUEIREDO, D. *Utilization of wasted sardine oil as co-substrate with pig slurry for biogas production – a pilot experience of decentralized industrial organic waste management in a Portuguese pig farm Bioresour Technol*, 116, p. 285–289, 2012.

FGV (Fundação Getúlio Vargas). *AgroAnalyses. Mercado de carbono - Negócios Verdes*. Nov. 2007. Disponível em <<http://www.agroanalysis.com.br/11/2007/sustentabilidade/mercado-de-carbono-negocios-verdes>> Acesso em: 12 jan. 2019.

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe). *Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização*. 5ª edição, Gülzow, Alemanha, 2010.

FONSECA, F. S. T.; ARAÚJO, A. R. A.; HENDGES, T. L. *Análise de viabilidade econômica de biodigestores na atividade suinícola na cidade de Balsas - MA: um estudo de caso*. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Porto Alegre, Jul. 2009. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

GARCIA-ARRIAGA, V.; ALVAREZ-RAMIREZ, J.; AMAYA, M.; SOSA, E. H₂S and O₂ influence on the corrosion of carbon steel immersed in a solution containing 3M diethanolamine. *Corrosion Science*, v. 52, p. 2268–2279, 2010.

GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. *Optimal distributed generation placement in power distribution networks: Models, methods, and future research*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, p. 3420-3428, 2013.

GONÇALVES, C. D. C. Modelação do processo de digestão anaeróbia da forsu à escala industrial. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Lisboa, out. 2012. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144989026/Tese%20de%20Mestrado.pdf>> Acesso em: 19 mai. 2018.

GRABBER, J. H. How do lignin composition, structure, and cross-linking affect degradability? A review of cell wall model studies. *Crop Sci.* 820–31. 2005.

HANSEN, K.H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. *Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia*. *Water Research* v.32 p. 5-12, 1998.

HARTMANN, H.; AHRING, B.K. *Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview*. *Water Sci. Technol.*, 53. p. 7–22, 2006.

HARTMANN, H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. *Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*, IWA Publishing, UK, 2003.

HE, P. J. *Anaerobic digestion: An intriguing long history in China*. *Waste Management*, 30, p. 549– 550, 2010.

HENDRICKSON, R. G.; CHANG, A.; HAMILTON, R. J. Co-Worker fatalities from hydrogen sulfide. *American Journal of Industrial Medicine*, v. 45, p. 346–350, 2004. DOI: 10.1002/ajim.10355.

IBGE. *Produção da pecuária municipal 2017 – PPM 2017*. Rio de Janeiro, v. 45, p.1-8, 2017.

IBGE. *Pesquisa da Pecuária Municipal – 2017*. Tabelas 2017. Estado de Goiás. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 16 out. 2018.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Tempo – gráficos. 2019. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

IQBAL, H. M. N.; AHMED, I.; ZIA M. A.; IRFAN M. Purification and characterization of the kinetic parameters of cellulase produced from wheat straw by *Trichoderma viride* under SSF and its detergent compatibility. *Adv Biosci Biotechnol.* 149–56. 2011.

JAIN, S.; JAIN S.; WOLF I. T.; LEE J.; TONG Y. W. *A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* p. 142-154, 2015.

JORGE, L., H., A.; OMENA, E. Biodigestor. Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Mar. 2012.

JUNQUEIRA, S. L. C. D. *Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado.* Universidade do Rio Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica DEM/POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C.; *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.* Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves. p. 209, 2019.

KHALID, A.; ARSHAD M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSO, L. The anaerobic digestion of solid waste. *Waste Management.* p. 1737-1744, 2011.

LADISCH, R.; MOSIER, N. S.; YOUNGMI, K. I. M.; XIMENES, E.; HOGSETT, D. Converting cellulose to biofuels. *Chem Eng Prog.* 56–63. 2010.

LANSING, S.; MARTIN, J. F.; BOTERO, R. B.; SILVA, T. N.; SILVA, E. D. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology*, New York, v.101, p.4362-4370, 2010.

LAUREANO-PEREZ, L.; TEYMOURI, F.; ALIZADEH, H.; DALE, BE. *Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass.* *Appl Biochem Biotechnol*, 1081–99. 2005.

LI, J.; ZICARI, S. M.; CUI, Z; ZHANG, R. *Processing anaerobic sludge for extended storage as anaerobic digester inoculum.* *Bioresource Technology.* 2014; 166; 201-210.

LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. In: SIGERA, 4. Maio de 2015. Rio de Janeiro – RJ.

LIU, C.;YUAN, X.; ZENG, G.; LI, W.; LI, J. *Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste.* *Bioresource Technology.* 2008; 99; 882 – 888.

MACHADO, O. J.; FREIRE, F. B. *Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)*. Olam - Ciência & Tecnologia, v. 2, n. especial, p. 170, set 2009.

MAPA (Ministério da agricultura e pecuária). Citrus. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/citrus>> Acesso em: 13 ago. 2019.

MARQUES, S. M. A. A.; SILVA JÚNIOR, F. J.; MONTEIRO, M. K. D.; VIEIRA, A. S.; VENTURA, A. F. A.; VENTURA JÚNIOR, R. *Produção de biofertilizante, adubo orgânico e biogás para agricultura familiar*. Revista em Gestão, Educação e Tecnologia, (REGET). v. 18, n 3, set-dez. p. 990-999, 2014.

MARTIN, M. A.; SILES, J. A.; CHICA, A.F.; MARTÍN, A. *Biomethanization of orange peel waste*. *Bioresource Technology*, Essex, v. 101, p. 8993–8999, 2010.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, M.S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013*. *Renew Sust Energ Rev*. 36:412–427, 2014.

MAZZUCCHI, O. A. J. *Biodigestor rural*. São Paulo, CE.SP, 1980. 29p.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto – ETE. Probiogas*. Ed. 1, Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-guia-etes.pdf>> Acesso em: 18 mai. 2018.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). *Biomassa*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 18 mai. 2018.

MME (Ministério de Minas e Energia). *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro* - Junho/2018. p. 31. 2018.

MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. *Caracterização Química do Bagaço de Laranja*. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. São Paulo, SP, 2018.

OLIVEIRA, R. D. *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono*. (Trabalho de Conclusão de Curso) Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos-SP. 2009.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. *Manual de Treinamento em Biodigestão*. Instituto Winrock – Brasil vs 2. Fev. 2008.

PANT, D.; ADHOLEYA, A. *Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A*

review. *Bioresource Technology*, v.98, p.2321-2334, 2007.

PEREIRA, A. I. C. *Co-digestão anaeróbia de resíduos verdes e lamas de ETAR para produção de biogás*. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia), Universidade Nova de Lisboa, 2013.

PEREIRA, M. S.; GODOY, T. P.; GODOY, L. P.; BUENO, W. P.; WEGNER, R. S. *Energias renováveis: biogás e energia elétrica provenientes de resíduos de suinocultura e bovinocultura na UFSM*. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria*, v. 19, n. 3, p. 239-247, set-dez. 2015.

PORTAL BRASIL. *Energia Elétrica – Brasil é o maior gerador de energia eólica da América Latina*. Brasil, dez. 2017. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>> Acesso em: 24 out. 2018.

PRETTO M. *O esterco de suíno como substrato de biodigestores contínuos: observações quanto ao início de operação*. 1985. 53 p. Monografia (Graduação) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

PROBIOGAS. *Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil*, 1ª Ed. Ministério das Cidades. Brasília, 2016. 76p.

RAMPINELLI, G. A.; ROSA JUNIOR, C. G. *Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica*. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol.14, n. 2, jul-dez. 2012.

REIS, A. S. *Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio*. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. 2012. 79p.

RESENDE, J. A. *Dejetos bovinos para produção de biogás e biofertilizante por biodigestão anaeróbica*. Circular técnica, 110, Brasil. Juiz de Fora-MG, set. 2015.

RIEGER, C.; WEILAND, P. *Prozessstörungenfrühzeitigerkennen*. *Biogas Journal*, v. 4, n. 06, p. 18-20, 2006.

ROCHA, T.; GOMES, P. C.; DONZELE, J. L.; BARRETO, S. L. T.; MELLO, H. H. C.; BRUMANO, G. *Níveis de lisina digestível em rações para poedeiras no período de 24 a 40 semanas de idade*. *Ver. Bras. Zootec.*, Viçosa, v.38, n.9, p.1726-1731, 2009.

RODRIGUES, A.; SANTOS, R. F.; AVACI, A. B.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E. *Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça*. *Acta Iguazu Nova*, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 80-93, 2012.

ROSSETO, A.; SANTIAGO, A. D. *Adubação – Resíduos alternativos*. Agência Embrapa de Informações Tecnológicas – AGEITEC. Disponível em: < https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_7112_00516717.html> Acesso em: 03 ago. 2019.

ROSTAGNO, H.S.; ALBINO, L.F.T.; DONZELE, J.L.; GOMES, P.C.; OLIVEIRA, R.F.M.; LOPES, D.C.; FERREIRA, A.S.; BARRETO, S.L.T. E EUCLIDES, R.F. 2011. *Tabelas Brasileiras para Aves e Suínos: Composição de Alimentos e Exigência Nutricionais*. 3a ed. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2011. 252 p.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T.; HANNAS, M. I.; DONZELE, J. L.; SAKOMURA, N. K.; PERAZZO, F. G.; SARAIVA, A.; TEIXEIRA, M. L.; RODRIGUES, P. B.; OLIVEIRA, R. F.; BARRETO, S. L. T.; BRITO, C. O. *Tabelas Brasileiras para Aves e Suínos: Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais*. 4ª Ed. Departamento de Zootecnia. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2017. 488 p.

SALEH, B. B. Determinação das Emissões de Metano (CH₄) em Lagoas de Estabilização de Dejetos de Suínos na Região de Rio Verde-GO. (Tese de Doutorado) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica- RJ. Jul. 2014.

SALMINEM, J. K.; SAARIJARVI, S.; TOIKKA, T. *Alexithymia and health-related quality of life Journal Psychosomat. Res.*, v. 52, 324-324. The Boulevard, langford lane, kidlington, Oxford , England: Pergamon-Elsevier Science Ltd, 2002.

SANTOS, A. *A importância da citricultura nacional*. Senar Goiás. Artigo. Jun, 2019. Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/senar/noticias/artigo/a-importancia-da-citricultura-nacional>> Acesso em: 13 ago. 2019.

SANTOS, D. H. D. *Adubação fosfatada no plantio da cana-de açúcar a partir de torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel*. 35 f. Dissertação de Mestrado, Universidade do Oeste Paulista, 2009. Presidente Prudente, SP, 2009.

SANTOS, L. A.; SANTOS, A. F. M. S.; VALENÇA, R. B.; JUCA, J. F. T.; OLIVEIRA, C. R. M. *Produção de biogás a partir de bagaço de laranja*. Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia, 4. Set, 2018.

SBERA (Sociedade Brasileira dos Especialistas em Resíduos das Produções Agropecuária e Agroindustrial); EMBRAPA – SUÍNOS E AVES (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – SUÍNOS E AVES. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia-SC, 2019. 209 p.

SCARPETTA, A.; HOFFMANN, R.; MAYER, F. *Avaliação da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da biodigestão de dejetos suínos*. Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos – UFSM; UFSM; UAB. Quaraí – RS, 2014.

SCHNÜRER, A.; JARVIS, A. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Waste Management. Mälmo, 2009.

SEYFRIED, C.F. *Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern*. Korrespondenz Abwasser 37, pp. 1247 – 1251, 1990.

SHEEHAN, G. J.; GREENFIELD, P. F. Utilisation, treatment and disposal of distillery wastewater. *Water Research*, v. 14, p. 257-277, 1979.

SILES, J. A.; VARGAS, F.; GUTIÉRREZ, M.C.; CHICA, A. F.; MARTÍN, M. A. Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. *Bioresource Technology*, Essex, v. 211, p. 173-182, 2016.

SIQUEIRA, L. M. *Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbia da vinhaça em reator de leito fluidizado*. 130 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2010.

SOUZA, M. E. *Fatores que influenciam a digestão anaeróbia*. *Revista DAE*. v. 44, p. 88-94, 1984.

STEIL, L. Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos. 2001. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R; SCHIRMER, W. N; *Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono—estudo de caso*. *Seminário: Ciências agrárias*, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010.

TARRENTO, G. E., MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedade rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: SIMPEP, 13. 2006. Bauru-SP, Brasil.

TEIXEIRA, J.C. *Utilização de polpa cítrica na alimentação de bovinos leiteiros*. Parte I. *Milk-bizz Technology*, v. 1, n. 3, p. 25-28. 2001.

USDA. *Foreign Agricultural Service*. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov>>. Acesso em: 19 ago. 2018.

USEPA. Multimedia Technical Support Document for the Ethanol-for-Fuel Industry. EPA 440/1-86/093. Washington, DC: Guidance of Water Regulations and Standards, US Environmental Protection Agency, 1986.

VDI-Richtlinien (Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros). VDI 4630: Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf, Germany, 2006.

VITORATTO, E. *Tratamento de efluentes líquidos orgânicos: Sistemas Anaeróbios*. PROAC-QUA Processos de Tratamento de Efluentes e Com. Ltda (diretor técnico). São Paulo: Faculdade Oswaldo Cruz, 2004. 13 p.

WEILAND, P. *Anaerobic waste digestion in Germany: status and recent developments*. *Biodegradation*, v.11, p. 415-421, 2000.

WILKIE, A. C., RIEDESEL, K. J., OWENS, J.M. *Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks*. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, p. 63-102, 2000.