

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Efeito do pó de magnetita na produção de metano durante a digestão  
anaeróbia de dejetos de suínos**

**Maxi Estefany Huamán Córdova**

**Itajubá, 2019**

**Minas Gerais - Brasil**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Maxi Estefany Huamán Córdova**

**Efeito do Pó de Magnetita na Produção de Metano durante a Digestão Anaeróbia  
de Dejetos de Suínos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia de Energia

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Regina Mambeli Barros  
Coorientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

**Itajubá, 2019**

**Minas Gerais - Brasil**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Maxi Estefany Huamán Còrdova**

**Efeito do pó de magnetita na produção de metano durante a digestão anaeróbia  
de dejetos de suínos**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 06 de dezembro de 2019, conferindo à autora o título de Mestre em Ciências da Engenharia de Energia.

**Banca examinadora:**

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Regina Mambeli Barros – UNIFEI (Orientadora)

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora – UNIFEI (Co-Orientador)

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Maria Luiza Grillo Renó

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Leidine Mariani

**Itajubá, 2019**

**Minas Gerais - Brasil**

*À Deus e minha família, que são minha força dia a dia.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por ser meu guia neste caminho de vida e de estudos.

À minha família, Patrick e Gael, por me acompanharem com meus objetivos. Meus pais, Karina e Luis, que contribuíram com meus projetos, por serem meu exemplo de dedicação e comprometimento.

À minha avozinha Segunda Mondragón de Córdoba, por aquela sabedoria e palavras para seguir à frente de qualquer dificuldade.

Meus agradecimentos aos meus orientadores, professora Dr<sup>a</sup>. Regina Mambeli Barros e Professor Dr. Electo Eduardo Silva Lora, pela paciência e seus conselhos neste caminho de estudo.

A todos que em algum momento contribuíram para a execução deste trabalho. Agradeço de maneira especial ao Eruin, Barbara, Sandro, João e Athos, que tanto me ajudaram na realização da parte prática do trabalho, sem os quais, tenho certeza, este trabalho não teria sido possível.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

À Universidade Federal de Itajubá, pelos recursos, estrutura e excelência de ensino no mestrado em Engenharia de Energia.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa  
ignorância”*

(John F. Kennedy)

## RESUMO

CORDOVA, M. E. H. “Efeito do Pó de Magnetita na Produção de metano durante a digestão anaeróbia de Dejetos de Suínos”. 2019. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

A finalidade da dissertação é identificar os efeitos do pó de magnetita ao inserir dosagens de 8,0 e 12,0 g.L<sup>-1</sup> como aditivo no processo de digestão anaeróbia (DA) dos dejetos de suínos em reatores experimentais tipo batelada, quer dizer, de forma descontínua por um TRH de 70 dias. Nessa perspectiva, os experimentos foram em triplicata sob dois processos sequenciais, sendo analisadas as características físico-químicas e concentrações de metais pesados (Fe, Zn, Mn e Cu) antes e após a DA. Os rendimentos de CH<sub>4</sub>, avaliados sob condições normais de temperatura e pressão, mostraram que o pó de magnetita possui um impacto significativo nos rendimentos de metano durante o processo de digestão dos dejetos de suínos, obtendo a máxima produção de 3,82 . 10<sup>-1</sup> Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV com a adição de 8 g de magnetita durante o processo de batelada II, além de mostrar que as concentrações de elementos-traço para ambas dosagens foram condizentes com os dados da literatura. A estimativa do potencial energético na escala real da fazenda em estudo indicou uma produção diária de biogás de 98,10 m<sup>3</sup>/dia a uma concentração máxima de 59,8% de metano, gerando um potencial energético de 7,33 kW, correspondente à geração de 32.136,33 kWh/ano.

**Palavras-chave:** Pó de magnetita. Dejetos de suínos. Digestão anaeróbia. Biogás.

## **ABSTRACT**

**CORDOVA, M. E. H. “Effect of Magnetite Powder on Methane Production during anaerobic digestion of Swine Manure”. 2019. 92 f. Dissertation (Master's in Energy Engineering) - Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2019.**

The purpose of the dissertation is to identify the effects of magnetite dust by inserting dosages of 8.0 and 12.0 g.L<sup>-1</sup> as an additive in the anaerobic digestion (DA) process of swine manure in batch reactors, ie discontinuous for a 70-day HRT. From this perspective, the experiments were in triplicate under two sequential processes, analyzing the physicochemical characteristics and concentrations of heavy metals (Fe, Zn, Mn and Cu) before and after AD. The CH<sub>4</sub> yields, evaluated under normal temperature and pressure conditions, showed that the magnetite powder has a significant impact on methane yields during the swine manure digestion process, obtaining the maximum yield of 3.82. 10<sup>-1</sup> Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV with the addition of 8 g of magnetite during batch process II, and shows that trace element concentrations for both dosages were consistent with literature data. Estimated real-scale energy potential of the farm under study indicated a daily biogas production of 98.10 m<sup>3</sup> / day at a maximum concentration of 59.8% methane, generating an energy potential of 7.33 kW, corresponding to of 32,136.33 kWh / year.

**Key-words:** Magnetite powder, swine manure, anaerobic digestion, biogas.



## Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma do sistema produtivo de uma granja de suíno.....	22
Figura 2 - Etapas metabólicas na digestão anaeróbia.....	24
Figura 3 - Equivalência energética do biogás .....	36
Figura 4 - Fluxograma do estudo .....	46
Figura 5 - Localização da região em estudo .....	47
Figura 6 - Adição do aditivo na unidade experimental .....	48
Figura 7 - Fazenda de Suínos, Cachoeira de Minas/ MG.....	49
Figura 8 - (a) canaleta de fluxo descendente e, (b) Esterqueira da fazenda. ....	49
Figura 9 - Biodigestor de garrafa PET (dimensões em mm) .....	51
Figura 10 - Biodigestores de escala laboratorial contendo os substratos .....	52
Figura 11 - Manômetro .....	52
Figura 12 - Sistema completo de saída e coleta do biogás .....	53
Figura 13 - Produção de biogás na unidade experimental.....	54
Figura 14 - Diagrama de Medição de Pressão .....	55
Figura 15 - Concentrações médias dos parâmetros químicos antes e depois da biodigestão durante a batelada I.....	61
Figura 16 - Concentrações médias dos parâmetros químicos antes e depois da biodigestão durante a batelada II.....	62
Figura 17 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.1 para o processo de batelada I.....	66
Figura 18 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.2 para o processo de batelada II.....	67
Figura 19- Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.1 para o processo de batelada II .....	68
Figura 20 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.2 para o processo de batelada II.....	68

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características físico-químicas dos dejetos brutos produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina .....	25
Tabela 2 - Padrões de nutrientes e coliformes fecais aceitáveis para lançamento de efluente suinícola em curso d'água .....	27
Tabela 3 - As diversas fases produtivas dos suínos com suas produções médias de dejetos. ....	28
Tabela 4 - Geração média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos.....	28
Tabela 5 - Geração diária de dejetos de suínos de acordo com o sistema de produção (Litros/dia)....	28
Tabela 6 – Histórico do Biogás.....	34
Tabela 7 - Composição do biogás .....	36
Tabela 8 - Limites de concentração em metais solúveis .....	40
Tabela 9- Quantidade de cabeças de suínos do caso em estudo .....	48
Tabela 10 – Métodos de análises utilizados.....	50
Tabela 11 - Características gerais do GEM 5000.....	57
Tabela 12 - Comparação dos Parâmetros Antes e Após a DA da Batelada I .....	60
Tabela 13 - Comparação dos Parâmetros Antes e Após a DA da Batelada II .....	61
Tabela 14 - Resultados da Batelada I de Volume, Pressão e Volume CNTP.....	64
Tabela 15 - Resultados da Batelada II de Volume, Pressão e Volume CNTP.....	64
Tabela 16 - Rendimento de metano por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV no processo da batelada I .....	65
Tabela 17 - Rendimento de metano por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV no processo da batelada II .....	65
Tabela 18 - Resultados M.1 e M.2 do maior rendimento de metano registrado na Batelada I.....	66
Tabela 19 - Resultados M.1 e M.2 do maior rendimento de metano registrado na Batelada I.....	68
Tabela 20 - Resultados das análises de metais pesados para o processo de Batelada I.....	69
Tabela 21 - Resultados das análises de metais pesados para o processo de Batelada II.....	70

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos gordos voláteis
B <sub>0</sub>	Capacidade de produção de metano máxima para suínos
BEN	Balço Energético Nacional
BMP	Potencial de Produção de Metano
CC	Ciclo completo de suínos
CEQUAM	Centro de Estudos em Qualidade Ambiental
CH <sub>4</sub>	Gás metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DA	Digestão Anaeróbia
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Fe (OH) <sub>3</sub>	Hidróxido de ferro (III)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
GEE	Gases do efeito estufa
GEM	Monitor de Extração de Gás
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LABRES	Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água
MME	Ministério de Minas e Energia
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NaOH	Hidróxido de Sódio
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NT	Nitrogênio Total
O <sub>2</sub>	Gás Oxigênio
PET	Politereftalato de Etileno

pH	Potencial Hidrogeniônico
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
ppm	Partes por milhão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totais
SF	Sólidos Fixos
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempos de Retenção Hidráulica
UCT	Unidade de crescimento e terminação
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UPL	Unidade de Produção de Leitões

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos da Dissertação .....	17
1.1.1. Objetivo geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos.....	18
1.2. Justificativa .....	18
1.3. Estrutura do trabalho .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Dejetos de Suínos.....	21
2.1.1. Definição de dejetos de suínos .....	21
2.1.2. Características dos dejetos suínos.....	25
2.1.3. Estimativa do volume de dejetos .....	27
2.2. Magnetita.....	29
2.2.1. Ocorrência .....	29
2.2.2. Estrutura e Propriedades Gerais .....	29
2.2.3. Influência do Eletromagnetismo na Biodigestão Anaeróbia.....	30
2.3. Digestão Anaeróbia.....	31
2.3.1. Definição de digestão anaeróbia.....	31
2.3.2. Hidrólise .....	31
2.3.3. Acidogênese .....	31
2.3.4. Acetogênese.....	32
2.3.5. Metanogênese .....	33
2.3.6. Sulfetogênese.....	33
2.4. Biogás.....	33
2.4.1. Definição de biogás .....	33
2.4.2. Biogás no mundo.....	34
2.4.3. Caracterização do Biogás.....	35
2.4.4. Produção de biogás com resíduos da Suinocultura .....	36
2.4.5. Características operacionais do processo de produção do biogás .....	37
2.4.5.1. Temperatura.....	37
2.4.5.2. pH.....	37
2.4.5.3. Relação Carbono/ Nitrogênio (C/N).....	38

2.4.5.4. Nutrientes.....	39
2.4.5.5. Agitação.....	39
2.4.5.6. Tempo de Retenção Hidráulica.....	40
2.4.5.7. Concentração.....	40
2.4.5.8. Metais Pesados .....	40
2.4.5.9. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis.....	41
2.4.5.10. DBO / DQO .....	41
2.5. Biodigestor.....	42
2.5.1. Definição de biodigestores .....	42
2.5.2. Modelos de Biodigestores para o pequeno produtor .....	42
2.6. Geração de Energia .....	43
2.6.1. Principais tecnologias de conversão energética .....	44
2.6.2. Modalidades de produção de energia elétrica .....	44
2.6.3. Minigeração e Microgeração Distribuída .....	45
3 METODOLOGIA .....	46
3.1 FLUXOGRAMA DE ESTUDO .....	46
3.1.1. Considerações Iniciais .....	47
3.1.2. Fazenda escolhida.....	48
3.1.3. Caracterização físico-química dos substratos .....	49
3.2 Construção do modelo experimental.....	50
3.2.1 Montagem do biodigestor .....	51
3.2.2. Montagem do Sistema de Aquecimento .....	52
3.2.3. Montagem do Sistema de Saída do Biogás .....	53
3.2.4. Quantidade adicionada de pó de magnetita em cada mistura.....	53
3.3.5. Tempo de Retenção Hidráulico (TRH).....	53
3.3.6. Volume do gasômetro da unidade experimental .....	54
3.3.7. Medição da pressão da unidade experimental.....	55
3.3.8. Volume corrigido na CNTP .....	56
3.3.9. Composição do biogás .....	57
3.3.10. Determinação da geração de metano e potencial de energia.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60
4.1. Composição das Amostras.....	60
4.2. Volume corrigido na CNTP.....	64

4.3. Composição do biogás.....	66
4.3.1. Resultados do processo de Batelada I.....	66
4.3.2. Resultados do processo de Batelada II.....	67
4.4 Análise de metais pesados para os processos de Bateladas I e II .....	69
4.5. Avaliação do potencial energético .....	70
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	71
5.1. Conclusões.....	71
5.2. Recomendações.....	72
APÊNDICE A – Resultados M.1 e M.2 das medições do biogás gerado pelos biodigestores da Batelada I.....	73
APÊNDICE B – Resultados M.1 e M.2 das medições do biogás gerado pelos biodigestores da Batelada II .....	74
6 REFERÊNCIAS.....	75
ANEXO A - Caraterização química de entrada e saída para os processos de Batelada I e II dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019).....	88
ANEXO B - Geração de gases das unidades experimentais no processo de Batelada I dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019).....	89
ANEXO C: Geração de gases das unidades experimentais no processo de Batelada II dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019).....	90
ANEXO D: Análises de metais pesados dos dejetos de suínos sem mistura antes e depois da biodigestão, segundo Castro e Silva et al (2019).....	91
ANEXO E: Capacidade de produção de metano máxima para suínos ( $B_0$ ).....	92

# 1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, o conceito do biogás está sendo valorizado para novas pesquisas, visando à preservação do meio ambiente ou para fomento de novas fontes de energia, desenvolvidas visando a avaliação do potencial de produção de energia em função das matérias-primas. Entretanto, deve-se levar em consideração fatores como os custos e métodos mais competentes, procurando assim, novos aditivos para analisar o comportamento em uma digestão anaeróbia (DA). Segundo Drumm et al (2014), o uso de fontes alternativas de energia provenientes de combustíveis fósseis está vinculada a distintos problemas ambientais, como a contaminação do solo e dos recursos hídricos. Tais problemas são ocasionados pela poluição atmosférica, procedente da liberação de hidrocarbonetos (HC), óxidos como o de enxofre (SO<sub>x</sub>), nitrogênio (NO<sub>x</sub>), e monóxido de carbono (CO). Destaca-se que, a partir desse contexto, tem-se desenvolvido novos tipos de pesquisas direcionadas à geração de energia derivadas da biomassa. Nesse campo, ressaltam-se a cana de açúcar, os resíduos sólidos urbanos (RSU), florestais, agrícolas e agropecuários. Com base nas estatísticas do ano de 2018 sobre energia utilizada no Brasil, o biogás fornece cerca de 1% da oferta interna de energia elétrica brasileira, de acordo com dados nacionais (EPE, 2019).

Porém, Lima Júnior et al (2014) evidenciou que o aproveitamento de determinadas fontes limita-se pela falta de informação sobre o potencial energético, que é muito importante para otimizar a produção. Atualmente, existem alguns obstáculos para o emprego das energias alternativas. Alguns desses obstáculos são o alto investimento inicial, bem como a ausência de legislação regulatória que permita a competitividade com as energias convencionais. Portanto, pode-se chegar à conclusão que o uso da biomassa como fonte energética traz a probabilidade de aproveitamento dos resíduos e a diminuição dos impactos ambientais ligados à disposição final inadequada dos mesmos. Alguns destes resíduos podem ser urbanos, da vinhaça de açúcar e, sobretudo, resíduos da pecuária, destacando-se entre esses últimos, aqueles procedentes da atividade de suinocultura. Esta atividade econômica hoje, se apresenta com um crescimento muito significativo no Brasil. No cenário agropecuário, a atividade de suinocultura contribui para 22% do Produto Interno Bruto Brasileiro (PIB), gerando 16 milhões de trabalhadores temporários e permanentes (SANTOS, 2014).

Por meio do uso de novos tipos de aditivos na DA, o rendimento do CH<sub>4</sub>, um dos componentes do biogás, pode ser maximizado, o que revelou modificações dos parâmetros envolvidos no



processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos pela interferência de campos eletromagnéticos. Existem evidências de que a produção de metano pode ser beneficiada por meio do desenvolvimento de reatores magnetizados (WANG et al, 2018a). É importante salientar, segundo Pérez-Gonzalez et al (2010), que a magnetita pode ser inorgânica ou biologicamente gerada. Estudos recentes mostraram que a magnetita funciona como um eletroduto para melhorar as taxas de biodegradação orgânica e a produção de metano em condições anaeróbias (AULENTA, et al, 2013; CRUZ VIGGI et al, 2014; KATO et al, 2012).

Portanto, existe um aumento na eficiência da atividade microbiológica em processos de biodegradação anaeróbia de compostos orgânicos sob campo magnético (MATOS G., 2018).

Nos programas de pesquisa, o uso da tecnologia para tratamento de dejetos de suínos recebeu destaque em diferentes estudos como o principal fator do alto potencial poluidor que ocasiona impactos ambientais, especialmente nos recursos hídricos (LEITE et al, 2011). A redução dos impactos ambientais por meio da diminuição de carga orgânica dos efluentes proporcionou possibilidades de geração de uma energia renovável, já que o biogás gerado pode ser aproveitado como energia elétrica, térmica ou mecânica, em substituição ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e à madeira (KUNZ et al, 2009; FERNANDES, 2012; SILVA, 2013). Ressalta-se que cada suíno adulto pode gerar, por dia, cerca de 7 a 8 litros de efluentes líquidos (DIESEL et al, 2002) e o ciclo de vida de cada suíno, para alcançar 100 kg, é de 140 a 150 dias (SALOMON et al, 2012). Existem muitos fatores que podem influenciar no processo de biodigestão anaeróbia, ocasionando mudanças na qualidade e quantidade do produto final, como a temperatura, o pH, a densidade da biomassa, a agitação, entre outras variáveis.

Nesse aspecto, a presente pesquisa visa a avaliar o impacto na produção de biogás e especificamente, do metano, por meio da DA de dejetos de suínos por meio da adição de magnetita para a condição brasileira, para aprimorar o seu aproveitamento energético, como fonte renovável de energia.

## **1.1. Objetivos da Dissertação**

### **1.1.1. Objetivo geral**

O objetivo do presente trabalho experimental é analisar a influência das duas doses de pó de magnetita de 8,0 e 12,0 g.L<sup>-1</sup>, como aditivo no processo de DA dos dejetos de suínos, avaliando o potencial da produção de biogás no processo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar o processo de produção do biogás por meio de reatores experimentais, para simular a biodigestão, realizados em triplicata sob dois processos sequenciais. São analisadas as características físico-químicas e concentração de elementos-traço antes e após o processo de DA.
- Quantificar o volume de biogás e rendimentos de CH<sub>4</sub> dos resultados das diferentes dosagens de pó de magnetita pelas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

## 1.2. Justificativa

A primeira justificativa refere-se ao descobrimento dos efeitos e o acréscimo da eficiência da DA devido às dosagens de magnetita adicionadas aos dejetos de suínos, além do reconhecimento do impacto na produção de metano.

Atualmente, o Brasil se encontra na quarta posição mundial como maior produtor e exportador de carne de suíno, atrás apenas da China, UE e EUA. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), no terceiro trimestre de 2019, foram abatidas um total de 11,67 milhões de cabeças de suínos, o que representa um crescimento de 0,8 % em relação ao mesmo trimestre de 2018. Deste modo, pode-se relacionar o desenvolvimento da suinocultura no Brasil como causa de uma maior quantidade de resíduos de dejetos de suínos, evidenciando, assim, a necessidade de um tratamento adequado a fim de minimizar o impacto ambiental gerado.

Dada a importância da destinação adequada dos resíduos gerados com o desenvolvimento da suinocultura, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) criou, em março de 2017, o projeto “Pecuária de Baixa Emissão de Carbono: geração de valor na produção intensiva de carne e leite”. O projeto faz parte do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), que aponta planejamentos para novas tecnologias para uma produção sustentável, tendo compromissos internacionais assumidos pelo Brasil na diminuição das emissões dos GEE no setor agropecuário, com o objetivo de estimular pesquisas com tecnologias para um melhor aproveitamento de resíduos e a gestão de recursos naturais, originando renda para milhares de produtores. O MAPA, em sociedade com o Instituto

Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA), aumentou as contratações de crédito para tratar dejetos na produção de suínos, com o objetivo de gerar investimentos na redução dos impactos ambientais provocados na atividade agropecuária.

De acordo com a lei 12.187/2009, institui-se a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), onde propõem-se, principalmente, a conciliação do desenvolvimento econômico-social com a proteção do clima e meio ambiente, além da redução das emissões de gases de efeito estufa causadas por atividades humanas em todo território nacional.

A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) é o documento do governo brasileiro que registrou os principais compromissos e contribuições para um futuro climático do país. No acordo de Paris, onde o Brasil se comprometeu a obter uma redução de 37% nas emissões até o ano 2025, abaixo dos níveis de 2005 e a possibilidade de redução de 43% das emissões até o ano 2030. Para cumprir com as metas de redução, a matriz energética do país pretende assegurar 45% de fontes renováveis. A previsão é restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de vegetação em território nacional, extinguir o desmatamento ilegal, entre outras indicações em diversos setores da gestão pública dos recursos naturais.

Por fim, a relevância deste trabalho é que permite mostrar o comportamento correspondente das dosagens como aditivo na biodigestão dos dejetos de suínos, introduzindo novas informações a respeito da geração de biogás, para acrescentar mais dados à comunidade acadêmica, agropecuária e empresarial.

### **1.3. Estrutura do trabalho**

- O Capítulo 2 refere-se à revisão da literatura. Basicamente, apresenta o levantamento bibliográfico em que foram abordados temas referentes aos processos, fatores e parâmetros mais relevantes empregados nesta pesquisa, usados para desenvolver a metodologia da dissertação. Como exemplo, mencionam-se: caracterização dos dejetos de suínos, magnetita, conceitos referentes ao biogás, à DA e aos biodigestores.
- O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada nesta pesquisa, em que se expõe as principais análises realizadas nas amostras em estudo, além de mostrar a construção, operação e monitoramento do modelo experimental.

- O Capítulo 4 apresenta os resultados dos processos de batelada antes e após a digestão anaeróbica, e a análise do potencial energético atingido.
- O Capítulo 5 mostra as conclusões a partir dos resultados obtidos com os objetivos expostos, e recomendações, como também apresenta o apêndice do trabalho.
- O capítulo 6 lista as referências bibliográficas citadas na dissertação, e apresenta os anexos com os dados experimentais que complementam a pesquisa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Dejetos de Suínos**

#### **2.1.1. Definição de dejetos de suínos**

Atualmente, apresenta-se um aumento na produção de suínos no Brasil e, deste modo, há um incremento significativo de dejetos, tendo uma relevância no contexto ambiental, uma vez que a poluição provocada pode gerar problemas ao meio ambiente (CARDOSO JUNIOR et al, 2015).

Cada suíno pode equivaler, em termos comparativos, a uma média de 3,5 pessoas em capacidade poluente (LINDNER, 1999). Utilizando-se o conceito de equivalência, se uma granja possui 600 suínos, o poder poluente é parecido ao de um núcleo populacional de 2.100 pessoas.

Pode-se realizar tratamentos adequados nos cursos de água para evitar o lançamento direto dos dejetos de suínos, que causam desequilíbrios ecológicos, além de contaminar as águas potáveis com nitratos, amônia e outros elementos tóxicos, devido a alguns constituintes dos dejetos destes animais que são a matéria orgânica, bactérias fecais e sedimentos.

A criação de suínos caracteriza-se por um conjunto de componentes interligados, ocorrendo a dinamicidade de insumos como água, energia, rações, medicamentos e sanitizantes, tipos de unidades da produção, técnicas de manejo e gerenciamento de efluentes (FERNANDES, 2012). Neste sentido, apresenta-se na Figura 1 os componentes de todo o processo que pode estar envolvido no sistema de produção de suínos.

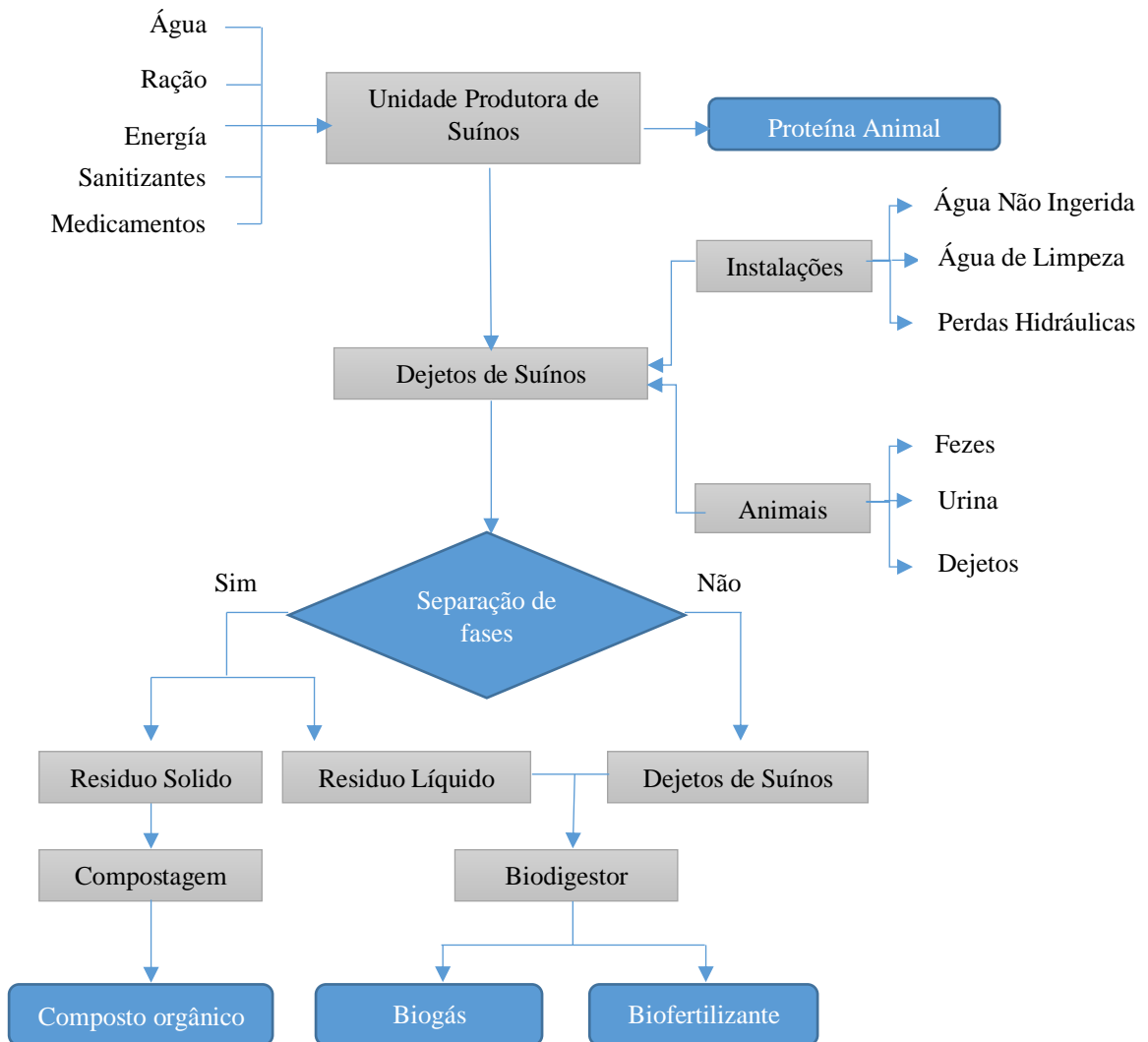


Figura 1 - Fluxograma do sistema produtivo de uma granja de suíno

(FONTE: Adaptado de FERNANDES, 2012)

De acordo com Sinotti (2005), deve-se considerar que as fezes e a urina não são os únicos efluentes da suinocultura, mas também há os restos das rações dos tipos da produção, resíduos das instalações, desperdício de água dos bebedouros, vazamentos no sistema hidráulico. Portanto, o volume originado dos dejetos pode mudar conforme o peso do animal, o consumo de água e produção de urina.

Entretanto, também existem outros tipos de tratamentos para os excrementos gerados, como: lagoas de decantação, esterqueira, bioesterqueira, compostagem, cama biológica (PERDOMO, 1996, DIESEL et al, 2002; PEREIRA et al, 2009; SARDÁ, 2016).

Neste contexto, os efluentes resultantes dos dejetos são formados, em sua maioria, de material orgânico e compostos como nitrogênio (N), potássio (K), sódio (Na), magnésio (Mg), cálcio (Ca), fósforo (P), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) (DIESEL et al, 2002).

Deve-se notar que os dejetos de suínos promovem variações na qualidade dos recursos naturais, seja solo, água ou ar. No caso do solo, pode ser aplicado na forma de adubo orgânico, que é muito aproveitado no país. Caso seja empregado de forma inadequada, pode causar o carreamento nas composições de nitrogênio (N) e fósforo (P) para as camadas subterrâneas do solo, ocasionando uma barreira na produção agrícola. Cabe salientar que o processo da DA em lagoas de estabilização gera os GEE, tais como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (SINOTTI, 2005). Portanto, além de se ter um controle dos GEE, também deve existir um domínio nas concentrações de metais pesados, como cobre (Cu) e zinco (Zn), os quais por sua alta toxicidade para os organismos presentes no solo, merecem maior precaução (SILVA, 2013).

O processo de geração do biogás em uma DA consiste na ação de diferentes grupos de microrganismos que, como o nome indica, ocorre na ausência de oxigênio livre e em condições estabelecidas de temperatura, umidade e acidez, promovem a origem de uma mistura gasosa (FERNANDES, 2012; RICARDO, 2012; SILVA, 2013).

De acordo com Fernandes (2012), a composição de gases pode ser alterada conforme o funcionamento do biodigestor e as características específicas dos substratos depositados. Uma vez feita a mistura, a mesma dá origem às diferentes reações metabólicas do grupo de bactérias presente no biodigestor, que podem ser divididas em quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Segundo Chernicharo (1997), pode existir uma quinta fase, descrita como a sulfetogênese, dependendo da composição química dos resíduos a ser tratado, como se observa na Figura 2.

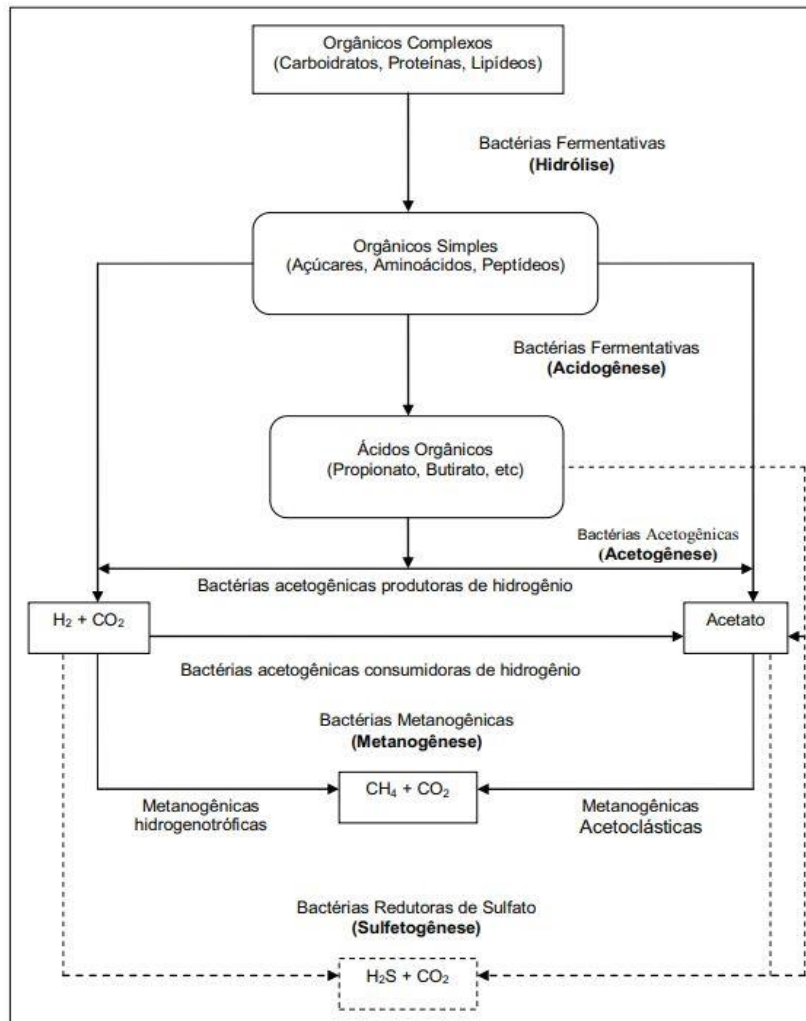


Figura 2 - Etapas metabólicas na digestão anaeróbia

Fonte: Chernicharo (1997)

A primeira etapa da biodigestão é a hidrólise. Nesta fase, os carboidratos são hidrolisados a açúcares, proteínas a aminoácidos e lipídeos a ácidos graxos (PECORA, 2006; FERNANDES 2012; SILVA, 2013). A segunda etapa do processo é a acidogênese, ou também conhecida como fermentação ácida, onde as bactérias fermentativas acidogênicas metabolizam os compostos gerados na primeira etapa (FERNANDES, 2012; PECORA, 2006). Além disso, nessa fase acontece a redução do pH do meio decorrente dos ácidos e gás carbônico provocados no processo. Conforme Pecora (2006), nas duas primeiras fases, as anaeróbias estritas são as bactérias responsáveis, as quais, na maior parte, podem ser facultativas. A terceira etapa é a acetogênese, onde as bactérias acetogênicas transformam os metabólitos originados na etapa anterior, convertendo os ácidos orgânicos, parte em hidrogênio e dióxido de carbono e parte em



acetato (ZHENG et al, 2009; SALOMON et al, 2012). Deste modo, na quarta etapa, as bactérias estão formadas por todos os substratos gerados até a etapa final da biodigestão, que é nomeada metanogênese, realizada pelas arqueas metanogênicas. Como consequência, o gás gerado com a bioconversão do material orgânico dá origem a um biogás combustível, pela presença do metano (SILVA, 2013). O biogás, além de sua contribuição como combustível para a geração de eletricidade, permite a captura de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na atmosfera, tornando-se um combustível ecológico, o que evita o aumento do efeito estufa (JEAN et al, 2019; PAGLIUSO; REGATTIERI, 2008).

Caso o efluente a ser tratado apresente sulfatos, ainda ocorre a fase da sulfetogênese, resultando na fase da metanogênese, o que reduz a produção do metano (CHERNICHARO, 2007). No caso da suinocultura, tem-se valores altos de ácido sulfídrico, o que se configura um problema na biodigestão.

### 2.1.2. Características dos dejetos suínos

O termo “dejetos” refere-se à mistura de fezes, urina, água dos bebedouros e de higienização, resíduos de ração, poeiras e outros materiais decorrentes do processo de criação dos animais. Esses dejetos podem se apresentar em forma pastosa ou sólida (KONZEN, 1993). No esterco líquido, pode-se encontrar combinação de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, sódio, manganês, ferro, zinco, cobre e até mais elementos que estão inclusos na alimentação dos animais (DIESEL et al, 2002).

Segundo o MAPA (2016), o teor de nutrientes nos dejetos de suínos depende de muitos fatores, como a idade dos animais, alimentação, temperatura, umidade, quantidade de água utilizada para limpar as instalações, e outras condições. As propriedades físicas, químicas e biológicas podem ser obtidas por meio de medidas qualitativas e quantitativas. A Tabela 1 apresenta as características físico-químicas dos dejetos brutos de suínos na fase de crescimento e terminação.

Tabela 1 - Características físico-químicas dos dejetos brutos produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina

Variável	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)
DQO	11.530,2	38.448,0	25.542,9
Sólidos Totais	12.697,0	49.432,0	22.399,0
Sólidos Voláteis	8.429,0	39.024,0	16.388,8
Sólidos Fixos	4.268,0	10.408,0	6.010,2

Variável	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Média (mg/L)
Sólidos Sedimentáveis	220,0	850,0	428,9
Nitrogênio total	1.660,0	3.710,0	2.374,3
Fósforo total	320,0	1.180,0	577,8
Potássio total	260,0	1.140,0	535,7

Fonte: Adaptado de Silva (1996)

No caso dos dejetos de suínos, deve-se seguir parâmetros de controle e confiabilidade para se ter uma boa qualidade de efluente. Entre os principais parâmetros que são utilizados são mencionados os seguintes:

- Demanda Química de Oxigênio (DQO-mg/l): representa a quantidade de oxigênio indispensável para oxidar quimicamente a matéria orgânica e inorgânica oxidável da água.
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO-mg/l): é a unidade fundamental de medição de poluição dos efluentes. Obedece a quantidade de oxigênio necessário para que as bactérias depuradoras possam digerir cargas poluidoras na água. Quanto maior a quantidade da DBO, maior será a poluição ocasionada.
- Sólidos Totais (ST - mg/l): corresponde à matéria sólida contida nos dejetos e que continua após a retirada da umidade.
- Sólidos Voláteis (SV - mg/l): caracterizam a fração de material orgânico.
- Sólidos Fixos (SF - mg/l): indicam o teor de sólidos minerais.

Nutrientes:

- Nitrogênio Total (NTK - mg/l): O nitrogênio total está composto de amônia livre e do nitrogênio orgânico. A presença do nitrogênio total indica o grau de poluição do manancial causada por despejo de água com alta carga de fertilizantes nitrogenados. O limite máximo na água é 10 mg/l. Em teores elevados, na preparação de alimentos para crianças, pode causar uma doença de nome cianose (*methemoglobinemia*) (SABESP, 2010).
- Fósforo Total (mg/l): Em altas concentrações, nos cursos d'água, juntamente com o nitrogênio total, podem causar eutrofização (SOUZA et al, 2009; SILVA; BASSI,

2012), causando interferências nos usos desejáveis do corpo d'água, como por exemplo, o abastecimento doméstico e industrial (SPERLING, 2014).

Na Tabela 2, apresentam-se os parâmetros exigidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), realizado pelo Instituto Ambiental de Rio Grande do Sul, apresentando os valores de nutrientes e coliformes fecais para lançamento de efluentes suinícola em cursos d'água

Tabela 2 - Padrões de nutrientes e coliformes fecais aceitáveis para lançamento de efluente suinícola em curso d'água

Variáveis	Quantidade
Coliformes fecais	1%
Fósforo total	1,0 mg/l
Nitrogênio total	10,0 mg/l
Cobre	0,5 mg/l
Zinco	1,0 mg/l

Fonte: FEPAM (1995)

### 2.1.3. Estimativa do volume de dejetos

Os indicadores mais relevantes para calcular o volume são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, relacionadas aos sistemas de produção e fases produtivas dos suínos, dependendo das características existentes na granja.

Existem três tipos de unidades de produção. Segundo Oliveira (1993), a primeira é a do Ciclo Completo (CC). Esta unidade contém todas as fases do ciclo produtivo de suínos, do nascimento até a engorda. O segundo tipo é a Unidade de Produção de Leitões (UPL), em que se atinge a fase do ciclo produtivo que compreende os reprodutores, o nascimento dos leitões (maternidade) e crescimento inicial (creche, com peso que abarca de 6 a 25 kg) e a Unidade de Crescimento e Terminação (UCT), em que são encontrados os suínos com peso entre 25 a 100 kg.

Na tabela 3, apresenta-se a produção média diária dos dejetos relacionada com as diferentes fases produtivas da suinocultura.

Tabela 3 - As diversas fases produtivas dos suínos com suas produções médias de dejetos.

Classe	Esterco (kg/dia)	Esterco + urina (kg/dia)	Dejetos Líquidos (litros/dia)
Suínos (25 – 100 Kg)	2,30	4,49	7,00
Porca gestação	3,60	11,00	16,00
Porca lactação + leitões	6,40	18,00	27,00
Cachaço	3,00	6,00	9,00
Leitões na creche	0,35	0,95	1,40

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993)

Assim mesmo, a Tabela 4 mostra o uso de água diluídos com os dejetos gerados nas matrizes, dependendo da categoria de unidade da fazenda.

Tabela 4 - Geração média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos.

Tipos de Granja	Nível de diluição		
	Pouca	Média	Muita
Unidade de ciclo completo - UCC (l/Matriz)	100	150	200
Unidade de produção de leitões - UPL (l/Matriz)	60	90	120
Unidade de crescimento e terminação -UCT (l/animal)	7,5	11,2	15

Fonte: Adaptado de Perdomo et al, 1999)

Outro indicador é pelo volume de dejetos líquidos produzidos por dia, de acordo com a unidade de produção de suínos, que pode ser estimado de acordo com a Tabela 5

Tabela 5 - Geração diária de dejetos de suínos de acordo com o sistema de produção (Litros/dia).

Tipo de Sistema de Produção	Produção Diária de Dejetos (Litros/dia)
UCC/ Matriz	85,0
UPL/ Matriz	45,0
UCT/ Matriz	7,0

Fonte: Oliveira 1993; 2003; Dartora et al (1998a)

Por conseguinte, a estimativa do volume gerado na fazenda da pesquisa, de acordo com os indicadores mostrados, é da tabela 5, visto que, depende do tipo de unidade de produção e as matrizes.

## **2.2. Magnetita**

### **2.2.1. Ocorrência**

A magnetita, também chamada de ferrita de ferro, representada como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , é um óxido composto por íons de ferro de valências diferentes. É um minério de ferro, popularmente chamado ímã natural, encontrado em depósitos de ferro para a obtenção de ferro e aço. São dispersos em ambientes naturais, como solos e sedimentos (LIU et al, 2013; NIELSEN et al, 2010; SKOMURSKI et al, 2010).

Podem ser encontrados nas rochas ígneas e metamórficas, com certos tipos de bactérias como a *Aquaspirillum megnetotacticum* (KRUEGUER et al, 1989), em amplas quantidades das areias de praia, conhecidas como areia mineral, areia ferrosa ou areia preta.

No Brasil, no estado de Minas Gerais, existem relevantes depósitos ricos em minerais de ferro, que formam parte da região do Quadrilátero Ferrífero, principalmente hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) e magnetita, intercaladas com segmentos em quartzo e/ou dolomita (ROSIÈRE et al, 2005).

### **2.2.2. Estrutura e Propriedades Gerais**

A magnetita é um importante material magnético, com ampla aplicação como adsorvente em processos de tratamento de efluentes contaminados. Tem em sua composição química 31,0% de FeO e 69,0% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e cristalografia isométrica de classe hexaoctaédrica. (MARTINHO, 2014)

Algumas características de interesse são as seguintes: a densidade é de  $5,2 \text{ g.mL}^{-1}$ , a dureza de 5,5 a 6, o ponto de fusão é de  $1597 \text{ }^\circ\text{C}$ , é solúvel em ácidos e insolúveis em água, pode ser descoberta sob a forma de cubos ou em pó, e tem como cor o preto metálico e brilho lustroso. (ORTIZ, 2000)

O tipo de estrutura é espinélio, intensamente magnético, semelhante à montmorilonita, com íons  $\text{O}^{2-}$  de empacotamento cúbico, portanto os íons maiores  $\text{Fe}^{2+}$  nos interstícios octaédricos, a metade dos íons  $\text{Fe}^{3+}$  em sítios octaédricos e metade restante em posições tetraédricas, semelhante a de muitos minerais (SCOTT et al, 2005).

### **2.2.3. Influência do Eletromagnetismo na Biodigestão Anaeróbia**

Atualmente, o ponto de aumentar a eficiência nos processos anaeróbios gera novas pesquisas, das quais os avanços tecnológicos podem mostrar uma redução do tempo de retenção hidráulica dos compostos no interior de reatores e, por conseguinte, minimizar os custos com redução de equipamentos (HARITWALL et al, 2015; BAGHER et al, 2015).

No que concerne aos resíduos de suinocultura, a produção de baixo teor de metano e altos níveis de metais no lodo, geram uma limitação para a viabilidade da digestão (LIANG et al, 2017).

Wang et al (2017) analisaram os efeitos de diferentes quantidades de pó de magnetita (1.5 g, 3 g, 4.5 g e 6 g) na codigestão anaeróbia de esterco de porco e palha de trigo. Os pesquisadores encontraram, por meio do modelo de Gompertz, a eficiência ótima do processo de DA ao adicionar 3 g de pó de magnetita, com maior potencial de produção de metano (206 mL/g ST).

A magnetita funciona como um eletroduto para transferência direta de elétrons, quer dizer, que os elétrons são transferidos de um organismo doador para um outro organismo através de condutores abióticos, como o que acontece com as nanopartículas de magnetita, evidenciando um acréscimo nas taxas de rendimento de metano (AULENTA et al, 2014; CRUZ VIGGI et al, 2014; KATO et al, 2012).

Além disso, a magnetita natural (M) contém diferentes tipos de metais que são essenciais para os organismos metanogênicos (LIU et al, 2015) e pode atuar no processo, como na disposição das ligações de hidrogênio, nos arranjos das moléculas da água, no pH da solução, na permeabilidade das membranas celulares dos microrganismos e outras (BANIK et al, 2006; ZIELIŃSKI et al, 2013; DEBOWSKI et al, 2014; HARITWAL et al, 2015; DEBOWSKI et al, 2016).

Estudos sobre a aplicação de magnetita examinaram os efeitos dos materiais condutores em substratos complexos. Por exemplo, a adição de magnetita melhora o rendimento na produção de CH<sub>4</sub> em digestores anaeróbios, a partir de resíduos alimentares municipais, a taxa de produção de metano de 3,7m<sup>3</sup><sub>CNTP</sub> / m<sup>3</sup>.d, mostrou um acréscimo, obtendo o valor de 4,8m<sup>3</sup><sub>CNTP</sub> / m<sup>3</sup>.d, correspondente a um valor de carregamento orgânico de 18,2 kg /m<sup>3</sup>.d (LEI et al, 2018), no caso dos lodos ativados conseguiu atingir um acréscimo de 7,3% de metano com a magnetita (PENG et al, 2018; WANG et al, 2018c; ZHAO et al, 2018) e águas residuais acelerou a produção de metano em 26,6% (WANG et al, 2018a; YIN et al, 2018).

Nesse ponto de vista, ainda é necessário que sejam realizadas mais pesquisas, de tal maneira a obterem-se mais dados referentes ao desempenho do campo eletromagnético para a geração do biogás a partir de diferentes misturas.

## **2.3. Digestão Anaeróbia**

### **2.3.1. Definição de digestão anaeróbia**

A DA é definida como uma complexa interação por diferentes grupos de micro-organismos, os quais trabalham na conversão da matéria orgânica em metano, gás carbônico, gás sulfídrico e outros gases, bem como novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2007), além de conseguir uma redução do potencial poluidor, para aproveitamento energético e a produção de biofertilizante (NOGUEIRA, 1992; AMARAL et al, 2004; CAMPOS et al, 2005).

Para geração do biogás na DA deve existir, em todas as fases do processo, um equilíbrio. Nesta digestão, a degradação e estabilização da matéria orgânica são sensíveis às variações que podem ocorrer durante o funcionamento do reator. Se o processo for inadequado, torna-se instável, o que resulta na diminuição de produção do biogás (WEILAND, 2010).

### **2.3.2. Hidrólise**

A hidrólise é a primeira fase da decomposição. Nessa etapa, compostos como carboidratos, proteínas e lipídios, em grande parte insolúveis e complexos, são transformados em aminoácidos, açúcares e ácidos gordos de cadeia longa. O processo ocorre pela ação de bactérias hidrolíticas, que agem liberando enzimas que decompõem o material através de reações bioquímicas (BATSTONE & JENSEN, 2011).

Segundo Pavlostathis e Giraldo-Gomez (1991), a hidrólise é assumida como um fator limitante da DA. Se a velocidade da hidrólise for superior à velocidade da metanogênese, ocorre a acumulação de Ácidos Graxos Voláteis (AGV) e hidrogênio, que podem levar à acidificação irreversível do digestor. A velocidade da hidrólise é uma fusão, dentre outros fatores, do pH, temperatura, concentração de biomassa, tipo de matéria orgânica e tamanho das partículas.

### **2.3.3. Acidogênese**

A segunda fase da biodigestão, também chamada de acidogênese, corresponde à fermentação e à oxidação anaeróbia. Nessa fase, bactérias fermentativas acidogênicas agem sobre os

compostos intermediários, como aminoácidos, sacarídeos e ácidos graxos, que são transformados em AGV, como os ácidos propiônico e butírico, ou em outros produtos orgânicos ácidos, tais como lactato, ou em álcoois, como etanol e butanol (FRITSCH, HARTMEIER & CHANG, 2008).

A concentração de hidrogênio intermediário influencia os tipos de compostos formados nesta fase do processo (BATSTONE & JENSEN, 2011). O desempenho da acidogênese no reator é importante, especialmente durante a estabilização anaeróbia de duas fases de resíduos, pois é ela que vai fornecer os compostos intermediários mais adequados para a atividade subsequente (SCHIEVANO et al, 2012).

Azargoshasb et al (2015) discorrem sobre as atividades dos micro-organismos no biodigestor. Em seus relatos, tem-se que a oxidação anaeróbia do ácido butírico é mais favorável do que a conversão de ácido propiônico, devido à inibição de AGV sobre a conversão anaeróbia de butírico ser semelhante ao de propionato de metilo. Ambos diminuem o pH do reator, o que pode contribuir para a inibição do crescimento de micro-organismos responsáveis pelas fases acetogênicas e metanogênicas. Além disso, em termos de termodinâmica, o ácido propiônico impede a conversão anaeróbia de butírico. Ambos inibem a conversão metanogênica de etilo, impedindo o crescimento das arqueas metanogênicas acetoclásticas, responsáveis pela conversão do acetato em metano.

O controle do pH é fundamental nessa fase da DA, pois esse parâmetro pode influenciar a eficiência da produção de biogás (SCHIEVANO et al, 2012). Um pH baixo, entre 5 e 6, possibilita a produção de hidrogênio, inibindo a atividade metanogênica, que é muito limitada e exige uma faixa estreita de pH, com valores entre 6,5 e 7 (YASIN et al, 2011).

#### **2.3.4. Acetogênese**

A acetogênese é a terceira fase do processo e trata da formação do ácido acético. Nesta fase, os compostos são convertidos por bactérias acetogênicas em precursores do biogás (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono). Segundo Amani, Nosrati e Sreekrishnan (2010), uma espécie de micro-organismo transforma o AGV em etilo, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> que dão origem ao acetato.

Na acetogênese, elevadas quantidades de hidrogênio impedem a formação de compostos intermediários da acidogênese, o que acarreta o acúmulo de ácidos orgânicos que impedem a metanogênese, tais como ácido propiônico, ácido isobutírico, ácido isovalérico e ácido



caprício. Portanto, as bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) devem estar perfeitamente associadas às arqueas metanogênicas. Durante a formação do metano, as arqueas consomem hidrogênio e gás carbônico, o que forma um ambiente adequado para as bactérias acetogênicas (PAVLOSTATHIS & GIRALDO-GOMEZ, 1991).

### **2.3.5. Metanogênese**

Na metanogênese é realizada a formação do biogás. As arqueas metanogênicas convertem o ácido acético, o hidrogênio e o gás carbônico em metano. Os micro-organismos metanogênicos hidrogenotróficos formam o biogás a partir do hidrogênio e dióxido de carbono, e os organismos metanógenos acetoclásticos, a partir da decomposição do ácido acético (PAVLOSTATHIS et al, 1991; AMANI et al, 2010).

Os organismos metanogênicos, estritamente anaeróbios, são a parte mais sensível do processo, o que exige que as condições operacionais estejam adequadas para as suas necessidades (PAVLOSTATHIS et al, 1991).

### **2.3.6. Sulfetogênese**

Fase onde as bactérias diminuem os sulfatos e outros compostos sulfurados em sulfetos, onde são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997). Mas dependendo da quantidade de sulfato, pode surgir um incremento de produção de H<sub>2</sub>S em detrimento do metano.

## **2.4. Biogás**

### **2.4.1. Definição de biogás**

Na Resolução da ANP nº 685 de 29/06/2017, define o conceito de biogás como um gás bruto obtido da decomposição biológica de resíduos orgânicos, e indica que o biometano é um gás constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do Biogás.

Com o objetivo de conservar energia em zonas rurais, o biogás é o substituto de outros combustíveis, uma vez que é uma energia limpa, eficiente, e o mais importante, renovável. (YU et al, 2008).

Purwanto e Akiyama (2006) destacaram que o uso do biogás, originário da DA, ao invés do gás natural para a produção do hidrogênio, é uma maneira eficaz para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e para mitigar o aquecimento global. Segundo Lima (2005) e Figueiredo (2007), pode-se

definir o biogás como sendo um gás solúvel em água, cuja combustão não libera resíduos e não é tóxico. Entretanto, para os seres humanos pode ocasionar a morte por asfixia. Para Osorio e Torres (2009), além destes atributos, é um gás incolor, inodoro, inflamável e mais leve que o ar.

Para a CETESB (2011), existem ganhos energéticos e ambientais por meio da geração do metano contido no biogás. Holm-Nielsen et al (2009) afirmaram que o biogás pode ser empregado de diferentes maneiras, na forma bruta ou enriquecido. As aplicações do biogás podem ser para a produção de calor ou vapor, de eletricidade por meio de cogeração, uso como combustível para veículos, injeção nas redes de gás natural, entre outros usos.

#### 2.4.2. Biogás no mundo

Bley Jr. (2015) mencionaram o histórico e uso do biogás no mundo como se mostra na Tabela 6.

Tabela 6 – Histórico do Biogás

Ano	Acontecimento
10 a.C.	Os registros datam do século 10 a.C o termo de biogás., usado para aquecer banhos na região da Assíria;
1200	No século 13, os chineses cobrem os tanques de esgoto, com o objetivo de obter energia relatada por o explorador Marco Polo.
1600	No século 17, avaliaram que os gases inflamáveis podem ser originários a partir da decomposição de matéria orgânica.
1800	Em 1808, o químico inglês sir Humphry Davy divulga que o metano está na composição dos nos gases gerados a partir da digestão do esterco bovino.
	No século 19, na Índia foi realizado o primeiro equipamento biodigestor.
	No ano de 1884, o cientista francês Louis Pasteur introduz na Academia de Ciências o conceito dos usos que podem ser empregados através do gás, como o aquecimento e iluminação.
	No ano de 1895, na Inglaterra, o biogás produzido a partir de esgoto foi usado para fornecer energia às lâmpadas de uma rua da cidade de Exeter.
1900	No ano de 1920, na Dinamarca, o gás gerado a partir de águas residuárias é usado, inicialmente, para aquecer um tanque digestor.
	Na década de 1930, surgiu a época da microbiologia, o qual contribuiu para identificar as bactérias anaeróbias e as condições necessárias para uma produção de metano.

	No ano de 1957, o esterco de galinha foi convertido pela digestão anaeróbia em combustível gasoso, e foi possível graças ao inventor britânico Harold Bates. O processo é descrito no documentário Bates`'sCar: Sweet as a Nut (1974), de Tony Lanzelo.
	No ano de 1960, começou a ter um destaque na Índia o biogás usado como combustível para cozinhar nas comunidades.
	Na década de 1980, as ideias orientais inspiraram aos europeus para investir na tecnologia para procurar novas alternativas de energia, já que naquela época começou a ter oscilações do preço de petróleo.
2000	No início do século 21, no mundo todo, existia cerca de 1.483 usinas que a partir de resíduos geravam energia. O Japão lidera a lista do ranking com 800 usinas, seguido pelo Europa com 452, China com 100 e Estados Unidos com 86 usinas.

Fonte: Adaptado de Bley Jr., 2015)

Cabe assinalar que, no ano de 2013, o aterro Gramacho tornou-se o único fornecedor de biogás do mundo específico para uma refinaria de petróleo, em Duque de Caxias, localizada em Rio de Janeiro. Outro dado relevante feito no mesmo ano foi que foram utilizados 22 aterros para obter biogás e fornecer energia aos lares de 1,67 milhões de brasileiros (BLEY JR., 2015).

Atualmente, o Brasil possui no total 8.422 empreendimentos em operação para geração de energia, obtendo um total de 167.958.037 kW de potência instalada. (BIG, 2019). No caso das usinas termelétricas, a biogás, a partir de resíduos de animais, segundo o boletim de informações gerenciais da Aneel no primeiro trimestre do ano 2019, registrou 4.481 kW de potência instalada.

Está prevista para os próximos anos uma adição de 23.541.777 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 219 empreendimentos atualmente em construção e mais 391 em empreendimentos com construção não iniciada.

### 2.4.3. Caracterização do Biogás

O composto do biogás que uma produção pode gerar depende muito do substrato empregado no reator, além do modelo do biodigestor e das condições que envolvem o processo como temperatura, pressão, pH e tempo de retenção (SILVA, 1996). Essas características podem indicar a qualidade do biogás, já que quanto maior a quantidade de metano, maior será seu poder calorífico. Segundo Bley Jr. (2009), a geração de biogás a partir de resíduos de animais tem como principais compostos o metano (CH<sub>4</sub>): 40-70%; dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30-60%;

e outros gases: 1-5% do volume. Na Tabela 7, apresenta-se a composição aproximada do biogás.

Tabela 7 - Composição do biogás

Gases	Quantidade (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 80
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	20 a 40
Hidrogênio	1 a 3
Nitrogênio	0,5 a 3
Ácido Sulfídrico (H <sub>2</sub> S) e outros	1 a 5

Fonte: La Farge (1979)

As propriedades físico-químicas do biogás influenciam nos procedimentos a utilizar para sua depuração e combustão.

Na Figura 3 mostra-se a equivalência energética do biogás com 60% de metano comparado com outros combustíveis usuais, em termos de equivalência de 1m<sup>3</sup>.

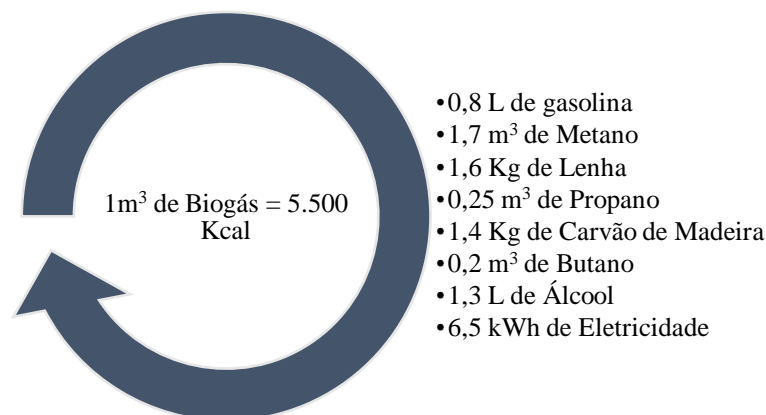


Figura 3 - Equivalência energética do biogás

(FONTE: Adaptado do PROJETO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 2001)

Conforme Figueiredo (2007), os gases mais importantes do biogás são o metano e o gás carbônico.

#### 2.4.4. Produção de biogás com resíduos da Suinocultura

A geração de biogás a partir dos dejetos de suínos depende do processo de produção escolhido e a influência das condições ambientais no digestor, além das concentrações de ácidos graxos (WARD et al, 2008).

Uma fonte importante de energia renovável é a partir da DA dos resíduos originários da suinocultura, além de minimizar o impacto ambiental da gestão do resíduo esterco. Porém, na digestão dos dejetos de suínos existem inconvenientes, como um baixo teor de sólidos e uma baixa relação C/N que causa uma alta concentração de N e/ou ácidos graxos, ambos considerados como potenciais inibidores da atividade metanogênica (ANGELIDAKI et al, 2011). Portanto, para melhorar a relação pode-se misturar com o co-substrato ou um aditivo.

#### **2.4.5. Características operacionais do processo de produção do biogás**

A quantidade de biogás que será produzido depende diretamente dos parâmetros de operação do biodigestor e da estabilidade do processo. Um processo instável pode levar a falhas no digestor anaeróbio, que podem, em alguns casos, ser irreversíveis (ASTALS et al, 2012).

As características que influenciam na produção de biogás são as mencionadas nos subitens a seguir.

##### **2.4.5.1. Temperatura**

Um dos principais fatores que afeta os consórcios bacterianos na DA é a temperatura (ZIGANSHIN et al, 2013). A DA pode ser realizada em três faixas diferentes de temperatura termofílica (45-60 °C), mesofílica (20-45 °C), e psicofílica (<20 °C).

Li et al (2012) demonstraram que a estabilidade da temperatura no processo de biodigestão está relacionada com melhores rendimentos de biogás e melhor desempenho do biodigestor. Existem efeitos importantes nas propriedades físico-químicas de componentes encontrados nos substratos anaeróbios, que influenciam na velocidade de crescimento e metabolismo dos micro-organismos, originando uma dinâmica populacional em um biodigestor.

A temperatura durante o processo de biodigestão pode alterar de 10 °C até 65 °C com picos de produção de biogás em casa fase (termofílica, mesofílica e psicofílica), tendo como uma faixa ideal de atuação entre 30 °C e 35 °C na fase mesofílica (MONTILHA, 2005). Alguns fatores podem intervir na oscilação da temperatura nos biodigestores, como defeitos nos equipamentos, estações de verão e inverno com temperaturas extremas, entre outros (GÜLZOW, 2013).

##### **2.4.5.2. pH**

O pH é a medida da acidez ou alcalinidade do conteúdo do reator, é um dos parâmetros que mais influenciam na eficiência da produção de biogás (SCHIEVANO et al, 2012).

No caso em que o pH do substrato a ser biodegradado estiver fora do intervalo ótimo, a capacidade para neutralizar os ácidos que proporcionam as mudanças rápidas e significativas será insuficiente, ocorrendo inibição do processo anaeróbio.

Um pH baixo entre 5 e 6 possibilita a produção de hidrogênio, o que inibe a atividade metanogênica (YASIN et al, 2011). Wang et al (2014) relatam que os micro-organismos metanogênicos exigem uma faixa estável entre 6,5 e 7. Cazier et al (2015) discorrem que o pH baixo pode ser resultado da acumulação de AGV, tendo grande influência sobre a metanogênese. Como H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> são produzidos por bactérias acetogênicas e acidogênicas, os gases dissolvidos podem acumular transitoriamente nos reatores com elevado teor de sólidos, com redução do crescimento dos micro-organismos metanogênicos a um pH mais elevado, entre 7 e 8.

Para garantir o crescimento adequado dos micro-organismos, deve-se controlar o nível de pH. A composição de AGV também é significativamente afetada pelo pH. Jiang et al (2013) demonstraram a variação da concentração de AGV no reator sob diferentes condições de pH. Em todas as condições, a concentração se alterou rapidamente no início do processo, e logo foi se estabilizando. No caso das arqueas metanogênicas e bactérias acidogênicas, tem-se níveis de pH ideais, portanto, em um sistema de estágio único é preciso adaptar o pH às condições ideais da população metanogênica, por serem micro-organismos mais sensíveis (ZHANG et al, 2009).

A estabilidade na formação de metano pode estar numa faixa mais ampla entre 6,0 a 8,0, sendo que valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 podem causar a inibição completa dos micro-organismos que geram o metano (CHERNICHARO, 1997).

#### **2.4.5.3. Relação Carbono/ Nitrogênio (C/N)**

Na DA, a otimização da relação C/N no processo impede a inibição por amônia (WANG et al, 2012). Quando a relação C/N é muito elevada, o nitrogênio é insuficiente para manter a biomassa celular e leva à degradação rápida de nitrogênio pelos micro-organismos. Os substratos com uma proporção demasiadamente baixa da relação C/N elevam o risco de inibição por amônia, que é tóxica para os micro-organismos metanogênicos e faz com que a utilização de fontes de carbono seja insuficiente. Ambos afetam negativamente a produção de metano, o que exige a apuração criteriosa na seleção do substrato (WANG et al, 2012).

As principais fontes de nutrientes dos micro-organismos que se encontram na DA são o carbono, nitrogênio e fósforo (GIZ, 2010). O intervalo ideal da relação C:N está na faixa de 20:1 – 30:1, já que os micro-organismos consomem aproximadamente 30 vezes mais carbono do que nitrogênio (PNUD, 2011). Porém, o nitrogênio também pode estar relacionado a estruturas de lignina e variar a relação (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2011).

O esterco animal tem sido utilizado como matéria-prima em todo o mundo para a produção de biogás e para recuperação de energia. Entretanto, o estrume sozinho não é o substrato mais eficiente para a produção de biogás, devido à baixa relação C:N. A produtividade pode ser então melhorada por meio de métodos aditivos alternativos (MURTO et al, 2004).

É importante mencionar que, no caso, a maior parte dos estrumes de animais contém uma baixa relação C/N, pois possui muito nitrogênio, decorrente da alimentação em concentrado (proteína) ministrado no cocho (LENZ, S/d).

#### **2.4.5.4. Nutrientes**

Existe uma variedade de micro e macro nutrientes no esterco de suíno que são indispensáveis para o crescimento dos micro-organismos para a DA. Porém, o esterco suíno tem uma elevada concentração de nitrogênio, amônia e baixo conteúdo de matéria orgânica (HARTMANN & AHRING, 2005).

A fim de superar as barreiras da DA de um único substrato, tem-se a codigestão de resíduos de dois ou mais substratos simultaneamente. A vantagem da codigestão consiste em misturar substratos que favorecem as interações positivas, ou seja, o equilíbrio de macro e micronutrientes, equilíbrio de umidade e/ou diluir compostos inibidores ou tóxicos, aumentar a carga orgânica volumétrica (COV) e iniciar a produção de metano, aumentando a viabilidade econômica de plantas de aproveitamento energético (MATA-ALVAREZ et al, 2014).

#### **2.4.5.5. Agitação**

Para se obter um ótimo rendimento de geração e biogás, no caso nos meses de inverno, deve-se encontrar a forma de manter constante a temperatura dentro do biodigestor. Para que a temperatura seja uniforme ao longo do processo, é necessária a agitação para provocar o contato

entre o substrato, os micro-organismos e os nutrientes, e impedir a formação de camadas de sedimentos nas paredes do biodigestor (KARLSSON, 2014).

#### 2.4.5.6. Tempo de Retenção Hidráulica

Na etapa inicial da DA, a produção de biogás é mais elevada e vai diminuindo gradualmente à medida que se aproxima do término do processo. Um maior tempo de retenção hidráulica está relacionado a uma maior redução da massa dos sólidos voláteis totais (SVT), o que tem como consequência uma maior quantidade de biogás acumulado.

#### 2.4.5.7. Concentração

A concentração de sólidos totais (ST) na mistura é um parâmetro importante na concepção do substrato sólido introduzido no biodigestor. Se a concentração for muito elevada, a medição de biogás pode ser mais viável. No entanto, em situação de sobrecarga, pode ocorrer acumulação de AGVs, inibindo a produção de biogás. Deste modo, para se ter um processo ótimo é importante avaliar o tipo de substrato empregado, avaliando-se os fatores limitantes da metanogênese (FERNÁNDEZ, PÉREZ & ROMERO, 2008).

#### 2.4.5.8. Metais Pesados

Alguns metais pesados podem ocasionar inibição na DA, tais como o Zn, Ni, Cr, Cu, Mn, Hg, Pb, Cd, Fe, já que as concentrações de seus íons livres são proporcionais às concentrações de íons sulfetos, e podem exceder um determinado limite na concentração, como pode-se observar na Tabela 8.

Tabela 8 - Limites de concentração em metais solúveis

Elementos	Concentração mg/L	Fonte
Cr	3	Moore
Ni	2	
Zn	1	
Cu	0,5	
Fe	2,8	Chian e Da Walle
Cu	0,9	
Zn	0,2	

Fonte: Vieira (1981) *apud* Moore. (1988) e Chian e Da Walle. (1990)



No caso de metais pesados como ferro, Weiland (2006) estabeleceu que as concentrações ideais para este elemento devem estar no intervalo de 1 a 10 mg/L. Outros pesquisadores, como Takashima e Speece (1990), foram mais abarcantes em seus resultados, obtendo um intervalo de 0,28 a 50,4 mg/L como concentração ideal, para concentrações de elementos-traço em biodigestores anaeróbios.

No que diz respeito ao elemento manganês, segundo os autores Bischofsberger et al (2005) e Sahn (1981), as concentrações ideais se encontram no intervalo de 0,005 a 50 mg/L e de 0,005 a 55 mg/L, respectivamente.

Para determinar as concentrações do elemento cobre, Sahn (1981) afirma que um intervalo de concentração ideal para o processo é o de 0,06 mg/L a 64 mg/L.

A resolução brasileira CONAMA Nº 375 (2006) constitui critérios para o emprego de lodo de esgoto gerado na planta de tratamento, como fertilizante de solo para agricultura, sendo os requisitos máximos para Zn e Cu iguais a 2800 mg/kg e 1500 mg/kg, respectivamente.

#### **2.4.5.9. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis**

É importante saber a quantidade de carga orgânica para obter controle no processo de DA podendo ser realizada por meio das medidas dos sólidos totais (ST) e voláteis (SV). Os SVs fornecem uma estimativa da matéria orgânica existente no substrato.

A diferença entre os valores dos SV na alimentação (Afluente) e os SV na saída (Efluente) da digestão, é a estimativa da redução (em porcentagem) dos SV e, conseqüentemente, avaliação do processo da digestão.

Cabe assinalar que, para obter um rendimento ótimo no processo, deve-se ter uma adequada produção de gás e remoção de matéria orgânica, que está relacionada ao conteúdo volátil dos sólidos do substrato. De tal modo, quanto maior o conteúdo volátil, maior constituirá o rendimento do processo.

#### **2.4.5.10. DBO / DQO**

Deve-se obter os resultados da DQO ou da DBO contidos no processo de DA pelas seguintes razões:

- Para os resíduos líquidos que contém baixos teores relativos de sólidos em suspensão, pode ser obtido o conteúdo de matéria orgânica do resíduo a ser digerido.
- No caso em que o lodo, após a digestão, fosse lançado em corpos d'água, desde que esteja dentro dos parâmetros de lançamento de efluentes dados pela legislação vigente, deve-se conferir a eficiência de remoção de matéria orgânica do processo.

## **2.5. Biodigestor**

### **2.5.1. Definição de biodigestores**

Os biodigestores são constituídos, basicamente, por um tanque de digestão (ou câmara), para armazenamento e digestão da biomassa, e por um gasômetro, que armazena o biogás produzido pela DA. O biodigestor é um reator onde ocorre a DA da matéria orgânica, produzindo biogás e biofertilizante (OLIVEIRA et al, 1993; OLIVEIRA, 2004).

### **2.5.2. Modelos de Biodigestores para o pequeno produtor**

A maioria dos biodigestores é constituída por uma câmara fechada, que serve para armazenar o material orgânico em solução aquosa, onde acontece a decomposição e gera o biogás que se acumulará na parte superior do biodigestor.

No caso dos biodigestores na suinocultura, podem ser considerados como: anaeróbio tubular ou também chamado de fluxo contínuo e de fluxo não contínuo ou denominado batelada.

Atualmente, na suinocultura, existe uma variedade de modelos de biodigestores, sendo cada um adaptado a uma necessidade de geração de biogás.

- Modelo Indiano: esse modelo é identificado por ter uma campânula que tem função de gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, e é de fácil construção. No caso da suinocultura, o modelo de biodigestor indiano é o mais adequado para o sistema de alimentação contínua, devido à disponibilidade dos resíduos dos produtores rurais.
- Modelo Chinês: é constituído, em sua maioria, de concreto e alvenaria, dispensando o uso de gasômetro em chapa de aço e cooperando para a redução de custos. Neste

modelo, podem acontecer problemas como o vazamento do biogás, caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada.

- Modelo Batelada: é utilizado para períodos mais longos, em que a matéria orgânica deve permanecer até que o ciclo da biodigestão anaeróbia esteja completo. Sua alimentação é descontínua e a produção de gás não é constante. Esse tipo de biodigestor adapta-se melhor para granjas avícolas.
- Modelo Canadense: é constituído por uma câmara de fermentação subterrânea que é revestida com lona plástica. O biodigestor precisa ser totalmente vedado e pode ser abastecido de forma contínua ou por batelada, além de ser empregado tanto em pequenas quanto em grandes propriedades.

## **2.6. Geração de Energia**

Para uma redução significativa da contaminação de corpos de água e preservação do ecossistema, é importante tratar os resíduos da suinocultura visando à geração de energia elétrica, térmica, além de biofertilizante. De acordo com Antonelli (2013), é uma forma promissora de gerenciamento do resíduo. Por meio da biodigestão, pode originar-se uma conversão da biomassa no resíduo ou dejetos em um biocombustível gasoso de um determinado poder calorífico, e o gás gerado pode ser empregado no motor ciclo Otto, para geração de energia elétrica, para satisfazer as necessidades da fazenda do resíduo. Além disso, é preciso estimar a área necessária para aplicar o biofertilizante produzido.

Conforme Bluemling et al (2013), no setor agrícola, a produção de biogás rural não depende somente da matéria orgânica, mas sim das estruturas institucionais e do envolvimento dos agricultores para tornar a energia disponível, além de reduzir a poluição a padrões ambientalmente toleráveis e dentro dos limites determinados em legislação pertinente.

Segundo Oliveira Júnior (2013), os problemas ambientais são a principal consequência do aumento de escala da atividade, criando a necessidade de novas alternativas para conseguir mitigar o problema, além de agregar valor aos resíduos gerados, e para a geração e o aproveitamento do biogás.

### **2.6.1. Principais tecnologias de conversão energética**

Conforme Costa (2006), para ser feita uma conversão energética do biogás, existem diferentes tecnologias que utilizam um processo de transformação de um tipo de energia em outro. Também se pode utilizar a queima direta do biogás em caldeiras para ser aproveitado o calor e a energia elétrica. Entretanto, há uma tecnologia muito utilizada para essa conversão energética, são os motores de combustão interna do tipo “Ciclo – Otto”. Podem-se mencionar algumas tecnologias como:

- Turbina a gás: pode-se classificar as turbinas a gás em ciclo fechado e ciclo aberto, dependendo do seu ciclo de operação. No caso de ciclo aberto, a pressão é elevada no compressor, sem adição de calor, visto que o compressor opera, em condições normais, em sistema adiabático, fazendo com que o trabalho de compressão aumente a temperatura do ar. Deste modo, o ar entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível, inicia o processo de queima. Para acionar o compressor, devem-se desprender os gases resultantes da combustão para energia mecânica.
- Microturbina a gás: são denominadas microturbinas as turbinas com capacidade elétrica entre 25 kWe a 250 kWe, e as turbinas de capacidade superior a 250 kWe. As microturbinas se caracterizam por serem do tipo radial, operando com velocidade de rotação nominal e por terem mancais suspensos ao ar de ligas metálicas, cerâmicas resistentes a altas temperaturas e componentes eletrônicos de alta potência.
- Turbina a vapor: São máquinas de combustão externa, ou seja, os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que flui no interior da máquina.

### **2.6.2. Modalidades de produção de energia elétrica**

Mediante o Decreto N° 2.003 (BRASIL, 1996), de 10 de setembro 1996, que regula a produção de energia elétrica, tem-se as modalidades de produção, tais como, Produtor Independente de Energia e Autoprodutor:

- Modalidade de Produtor Independente de Energia: recebe concessão ou autorização para produzir energia elétrica designada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

- Modalidade de autoprodutor: consiste na modalidade de produtor independente, com a diferença que, mediante a autorização da ANEEL, pode comercializar o excedente de energia.

Cabe assinalar que, mediante o Artigo 5º do decreto, estabelece-se que empreendimentos termelétricos menores que 5 MW não precisam de concessão ou autorização, mas necessitam informar ao órgão regulador para realizar um registro (BRASIL, 1996).

### **2.6.3. Minigeração e Microgeração Distribuída**

Com a Resolução Normativa N° 482 de 2012 (ANEEL, 2012), da ANEEL, conseguiu-se estabelecer as bases legais para a geração distribuída no Brasil. Porém, criou-se a Resolução Normativa N° 687 (ANEEL, 2015) de 2015, alterando a resolução anterior citada, abrindo uma possibilidade de compensação por ganho ou venda de energia. Conforme as novas regras em vigor (Art. 2º, Inciso II), são definidas as considerações de Microgeração Distribuída, que deve ser igual ou inferior a 75 kW, e na Minigeração Distribuída superior a 75 kW e inferior ou igual a 3 MW. No caso de fontes hídricas, deve ser inferior ou igual a 5MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL.

Porém, na resolução Normativa N° 687 (ANEEL, 2015) preconiza o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, no qual o agente mini ou microgerador cede gratuitamente o excedente de energia que produz para a rede elétrica, e permanece com um “crédito” de energia com a distribuidora, para ser empregado em até sessenta meses, permitindo, assim, o uso de qualquer fonte renovável.

No que diz respeito aos procedimentos necessários para se conectar à micro ou minigeração distribuída, a ANEEL estabeleceu regras que simplificam o processo: por exemplo, para realização da solicitação de acesso pelo consumidor, o prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que antes era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias. Além disso, agora os consumidores podem fazer a solicitação e acompanhar o andamento de seu pedido junto à distribuidora pela internet.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 FLUXOGRAMA DE ESTUDO

As fases de estudo dos processos, para caracterizar os efeitos do pó de magnetita na produção de metano durante a DA de dejetos de suínos e avaliação do ciclo de vida em uma escala laboratorial, são apresentadas na Figura 4.

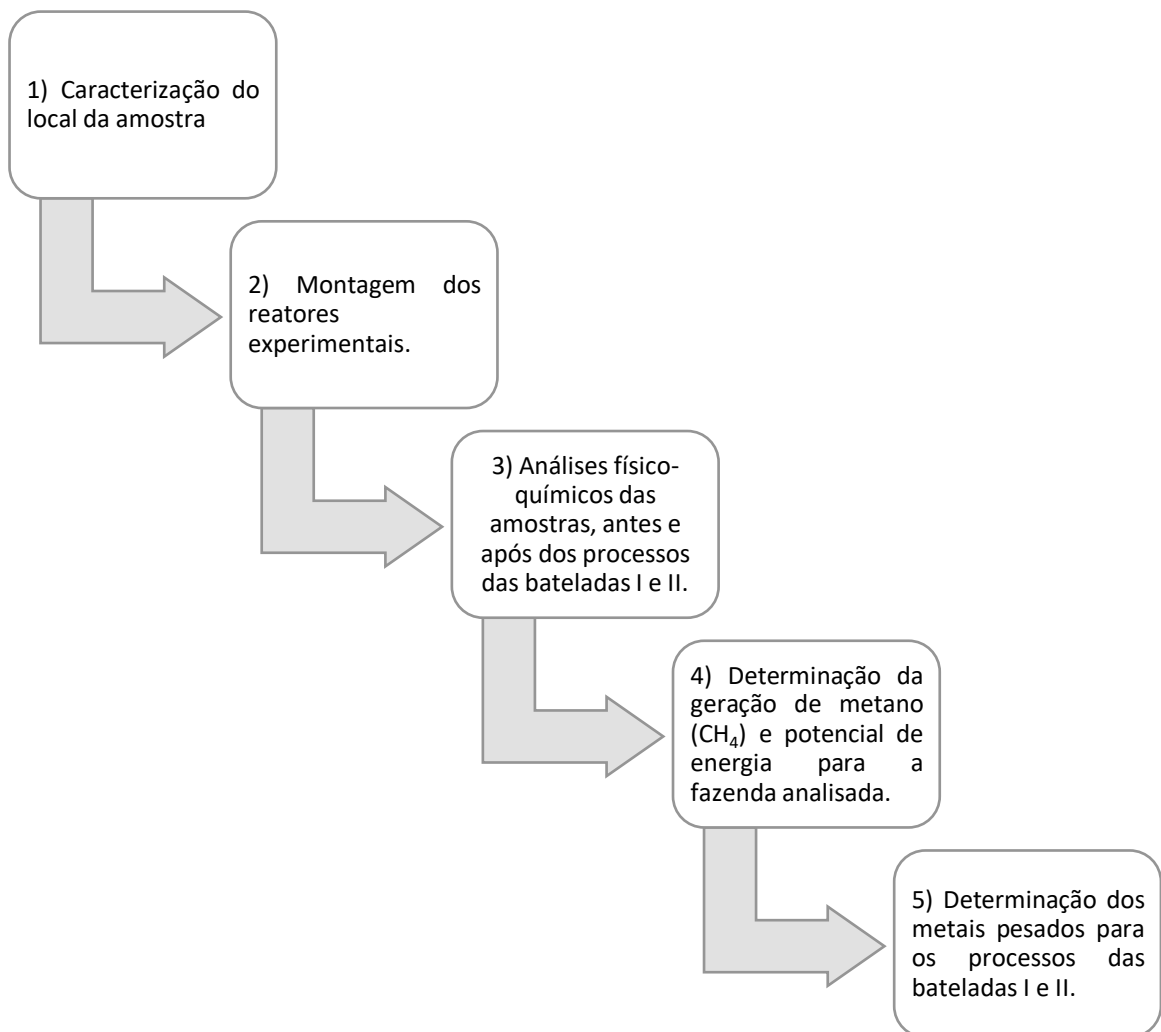


Figura 4 - Fluxograma do estudo

Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.1. Considerações Iniciais

Neste trabalho, foram avaliados doze biodigestores em escala laboratorial. A parte experimental do trabalho foi realizada no estado de Minas Gerais, no município de Itajubá, região Sudeste do estado, na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), sendo utilizado o Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água (LABRES), do Instituto de Recursos Naturais (IRN) para o desenvolvimento da pesquisa.

De acordo com a prefeitura municipal, a sede de Itajubá está localizado nas coordenadas geográficas 22° 30' 30" S e 45° 27' 11" W (Figura 7), com uma altitude de 850 metros acima do nível do mar. Conforme com a estação meteorológica da UNIFEI, no período entre março até junho de 2018, intervalo que foi realizada os testes experimentais, foi registrada uma temperatura média mínima de 9 °C e a máxima de 28 °C, com um clima temperado.

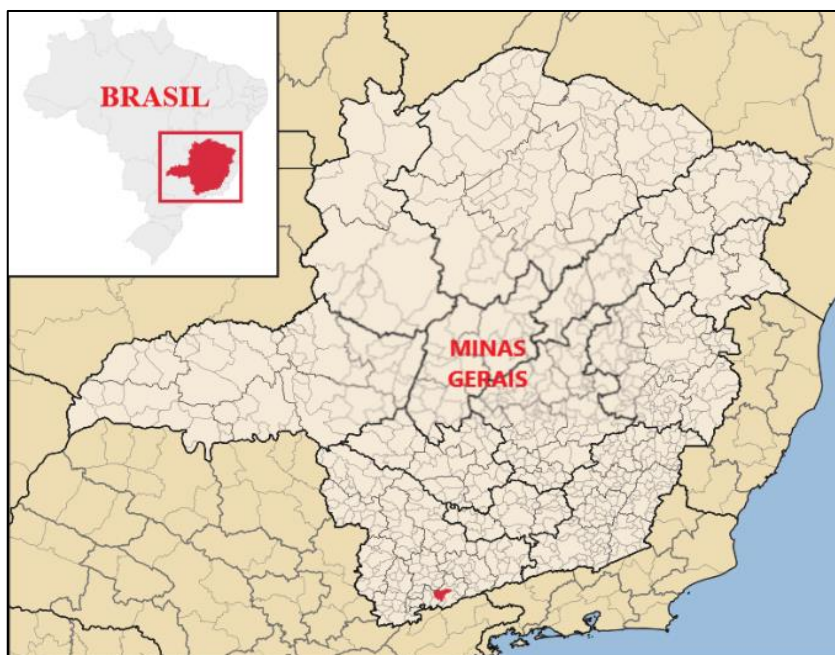


Figura 5 - Localização da região em estudo

Fonte: Adaptado de IBGE (2009)

A amostra de dejetos de suínos foi armazenada em um recipiente refrigerado e posteriormente conduzida a um *freezer* do laboratório por um período de quatro meses a uma temperatura média de -6° C. Depois, foram introduzidos, nas unidades experimentais (biodigestores), os dejetos de suínos e o pó de magnetita, como indicado na Figura 8, retirados diretamente da fazenda localizada no município de Cachoeira de Minas (MG), e inserindo as proporções de magnetita de 8,0 e 12,0 g.L<sup>-1</sup> para cada triplicada, adquiridas no município de Timóteo (MG),

para dar início ao processo de DA, para obter as medições da produção de metano da suinocultura da fazenda em pesquisa, composta por um plantel de 86 matrizes.



Figura 6 - Adição do aditivo na unidade experimental

Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.2. Fazenda escolhida

A empresa escolhida para realizar as coletas das amostras atua no agronegócio e na industrialização de sua produção de bovinos e suínos (Figura 9), no município de Cachoeira de Minas, sul do estado de Minas Gerais, Brasil, com as coordenadas geográficas 22° 21' 18" S e 45° 46' 44" W (849 m de altitude). Com relação ao nome da empresa, por razões de privacidade e de solicitação da empresa, não será revelado na dissertação. A fazenda conta com uma área de 300 hectares e possui cerca de 1.300 cabeças de suínos, cuja unidade de produção é de ciclo completo (CC), ou seja, desde seu nascimento até o abate (SOUZA et al, 2013).

Na tabela 9, apresentam-se os dados da produção dos dejetos, a partir das informações coletadas da propriedade em pesquisa.

Tabela 9- Quantidade de cabeças de suínos do caso em estudo

Característica	Quantidade
Total de cabeças	1300
Total de matrizes	86

Fonte: Elaborado pela autora



Atualmente, os dejetos da fazenda são retirados através de uma canaleta de fluxo descendente até chegar a uma esterqueira, com o objetivo de armazenar os dejetos e conseguir uma degradação biológica (figura 8), para após utilizar o digerido como fertilizante para a área agrícola.



Figura 7 - Fazenda de Suínos, Cachoeira de Minas/ MG



(a)

(b)

Figura 8 - (a) canaleta de fluxo descendente e, (b) Esterqueira da fazenda.

Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.3. Caracterização físico-química dos substratos

Os parâmetros analisados para caracterização dos dejetos foram: sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e nitrogênio total Kjeldahl. As análises foram feitas no Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água (LABRES), realizadas segundo o procedimento do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Cabe indicar que as análises de metais pesados foram realizadas

em parceria com o Laboratório do Centro de Estudos em Qualidade Ambiental (CEQUAM), UNIFEI. Na Tabela 10, apresentam-se os atributos considerados nas análises feitas.

Tabela 10 – Métodos de análises utilizados

Análises	Características	Método
Sólidos totais (ST)	Estufa a 103°C -105°C	Método 2540 B
Sólidos totais fixos (STF)	Mufla a 550°C	Método 2540 E
Sólidos voláteis (SV)		
pH	Potencio métrico	Método 4500-H+-B
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	Incubadora a 20°C durante cinco dias	Método 5210 B
Demanda química de oxigênio (DQO)	Leitura por espectrofotometria	Método 5220 D
Temperatura	Termostato com voltagem de 110V e Potência 75W	Aparelho - Termostato
Nitrogênio Total Kjeldahl		Método Kjeldahl
Metais pesados	Espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS).	Equipamento - SpectrAA Software

Fonte: Elaborado pela autora

Em cada amostragem, foram avaliadas a composição e produção do biogás, bem como a realização da coleta dos dejetos na entrada e saída de cada unidade experimental após o experimento de DA em batelada, para posterior análise em laboratório.

No que diz respeito ao pó de magnetita, empregado como aditivo, foi preparado por esmagamento e peneirado até que se transformasse em pó, com dimensões de partículas entre 0,5 mm e 1,0 mm. Posteriormente, foi lavado com água deionizada e, em seguida, secos a 105 °C por 12 h no forno.

### 3.2 Construção do modelo experimental

Nesta pesquisa, foram construídos doze biodigestores de escala laboratorial para realizar o processo de DA do substrato em estudo, a fim de se replicar um reator anaeróbio em dimensões reduzidas para descrever os efeitos e caracterizar os resultados da mistura.

### 3.2.1 Montagem do biodigestor

Foram montadas seis unidades experimentais (biodigestores anaeróbios), segundo o modelo proposto por Cañote (2018). Foram construídos reatores do tipo sequencial em batelada, utilizando-se de garrafas retornáveis de Politereftalato de Etileno (PET), cada protótipo com um volume total de 2,160 litros, dos quais a área útil foi de 1,62 litros dos substratos, e um espaço livre denominado gasômetro interno para armazenar o gás gerado de 0,54 litros.

O modelo de biodigestor utilizado consiste no uso de garrafas PET, como se mostra na Figura 11, nas quais são colocados o substrato.

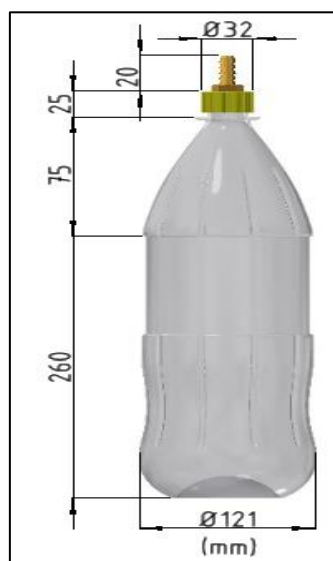


Figura 9 - Biodigestor de garrafa PET (dimensões em mm)

Fonte: Elaborado pela autora

O estudo considerou duas diferentes misturas inseridas nas unidades experimentais, sendo para cada triplicata uma adição de 8,0 e 12,0 g.L<sup>-1</sup> de magnetita. No total, foram testadas 12 condições, resultantes da média das duas diferentes concentrações (M.1, M.2), realizadas para os dois processos de batelada denominadas como Batelada I e II. Apresenta-se, na Figura 10, o modelo de biodigestor realizado na pesquisa.



Figura 10 - Biodigestores de escala laboratorial contendo os substratos

### 3.2.2. Montagem do Sistema de Aquecimento

Os biodigestores foram colocados em uma caixa de plástico, com água aquecida a 35 °C, com ajuda de uma resistência de aquário de um termostato com voltagem de 110V e potência de 75W, com o objetivo de manter uma temperatura constante. Além disso, procedeu-se a realização de agitação diária, para otimizar a produção de biogás dentro da unidade experimental. Para conseguir as medições de pressão, foi utilizado um manômetro caseiro, feito com uma mangueira posicionada em forma de U, fixada com 07 abraçadeiras em uma tábua de madeira coberta com papel milimetrado, como se observa na Figura 11. Em um dos lados deve ser ligado o sistema de saída do biogás e o outro lado da mangueira fica aberto, onde a pressão no sistema é igual a da atmosfera, quando os níveis do líquido em cada braço da mangueira em U são iguais (ATKINS, 2006).



Figura 11 - Manômetro

### 3.2.3. Montagem do Sistema de Saída do Biogás

Observa-se na Figura 12 o sistema de saída para a coleta do biogás gerado utilizando-se mangueira de gás de ¼ " com abraçadeiras e válvula de controle.



Figura 12 - Sistema completo de saída e coleta do biogás

### 3.2.4. Quantidade adicionada de pó de magnetita em cada mistura

De acordo com Gacitúa et al (2014), as nanopartículas de magnetita eletricamente condutivas aceleram o metabolismo sintrófico ou cooperativo, promovendo processos de transferências de elétrons extracelulares, favorecendo a eletrossíntese microbiana e aumentando a capacidade de certos micro-organismos reduzirem compostos inorgânicos ( $\text{CO}_2$  ou prótons). Segundo os autores, a adição de pequenas quantidades ( $10 \text{ g.L}^{-1}$ ) de nanopartículas do minério contribui para o aprimoramento da atividade catalítica, resultando maior eficiência no processo de digestão.

Wang et al (2017), investigaram os efeitos do pó de magnetita em diferentes quantidades, sendo 0 g, 1,5 g, 3 g, 4,5 g e 6 g, na co-digestão de estrume suíno e palha de trigo, por cada 206 ml da mistura, verificando uma eficiente produção de metano com a adição de 3 g do minério de ferro, num tempo de retenção hidráulica de 44 dias, sendo assim, a adição de  $14,5 \text{ g.L}^{-1}$  da magnetita com os substratos citados na pesquisa, alcança resultados positivos.

Nessa lógica, para o presente estudo, baseado nas proporções de estudos anteriores, foram consideradas doses  $\pm 2 \text{ g.L}^{-1}$  da pesquisa de Gacitúa sendo 8,0 e  $12,0 \text{ g.L}^{-1}$ , as quais foram adicionadas, respectivamente, em cada triplicata das unidades experimentais, denominados como M.1 e M.2.

### 3.3.5. Tempo de Retenção Hidráulico (TRH)

O TRH dos biodigestores em estudo é determinado pelo tempo em que o biogás alcança um teor de metano, entre 50-80%, ou chega ao pico da produção de metano e começa a descer os valores. O TRH dos biodigestores de cada batelada feita foi realizada em 70 dias.

### 3.3.6. Volume do gasômetro da unidade experimental

Para realizar a medição do volume do gasômetro, ou seja, o armazenamento do biogás gerado nos biodigestores de escala laboratorial, na parte superior da garrafa PET existe um espaço disponível, equivalente a  $\frac{1}{4}$  do volume total, sendo de 0,54 litros. Na Figura 13, pode-se observar as bolhas mostrando o processo de biodigestão.



Figura 13 - Produção de biogás na unidade experimental

O volume disponível foi estimado a partir do volume total (2,16 litros, equivalente a  $0,00216 \text{ m}^3$ ) da garrafa, de modo que aproximadamente 75% do volume total é preenchido com os substratos e 25% são reservados para compartimento de biogás como se mostra na Equação 1.

$$V_{\text{compartimento}} = \frac{V_{\text{total}}}{4} \quad (1)$$

Para medir o volume total de biogás produzido nos biodigestores, é realizada a soma dos 25% do volume do biodigestor, equivalente a  $0,00054 \text{ m}^3$ , juntamente com o volume da mangueira conectada à unidade experimental. O diâmetro das mangueiras é de  $\frac{1}{4}$  ", sendo equivalente a  $0,00635 \text{ m}$ . Nesse sentido, estimou-se o volume das mangueiras, já que são parte do sistema de saída dos gases, seguindo assim a Equação 2:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (2)$$

Onde:

$V$  = Volume das mangueiras ( $\text{m}^3$ ).

$r$  = Raio das Mangueiras (m);

$h$  = comprimento (m).

### 3.3.7. Medição da pressão da unidade experimental

Para a avaliação da pressão gerada pelo biogás produzido, foi ligada uma mangueira transparente ao sistema de saída dos gases e o outro extremo foi preenchido com água. Partindo do princípio do teorema de Steven, pode-se deduzir que a pressão no ponto é igual à pressão no ponto. Ao abrir a válvula de controle por alguns segundos, e aguardar o nível da água se estabilizar, uma vez que o biogás empurra a água, ocorre uma diferença de altura. A altura pode ser calculada por meio da Equação 3:

$$h_3 = h_1 + \Delta h \quad (3)$$

Na Figura 14, mostra-se o diagrama de medição de pressão de acordo com a movimentação da água feita no interior da mangueira transparente.

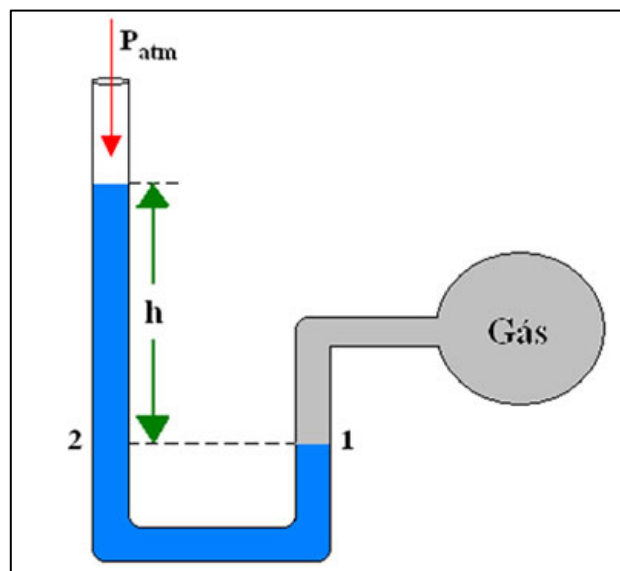


Figura 14 - Diagrama de Medição de Pressão

Portanto, a pressão pode ser medida empregando a Equação 4, levando em consideração que o valor da densidade dos dejetos de suínos se avalia conforme os resultados da pesquisa de

Scherer et al (1994/1996) e de Scherer e Castilhos (1994), e que o esterco apresenta uma densidade média de 1020 kg/m<sup>3</sup>.

$$P = \rho * g * 2h \quad (4)$$

Onde:

$\rho$ = Densidade (kg/m<sup>3</sup>);

$g$ = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$h$ = Altura (m);

$P$ = Pressão (N/m<sup>2</sup>).

### 3.3.8. Volume corrigido na CNTP

Com o objetivo de regularizar os dados, foram seguidas as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), segundo as leis de Boyle e Gay-Lussac, apresentada na Equação 5. Foram consideradas a pressão e temperatura locais referentes ao clima da cidade de Itajubá (MG), obtendo uma média de 935 mbar equivalente a 93,500 Pa, conforme a estação meteorológica local, e uma temperatura média anual de 20,1°C.

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \quad (5)$$

Isolando-se o volume a ser normalizado ( $V_n$ ), obtém-se a Equação 6:

$$V_{normalizado} = \frac{P_{abs} * V_g * T_c}{T_r * P_c} \quad (6)$$

Onde:

$V_n$ = Volume corrigido (m<sup>3</sup>);

$T_c$ = Temperatura corrigida do biogás para 20,1°C, expresso em 293,25 K;

$P_c$ = Pressão corrigida do biogás para 1 atm = 101.325 Pa;



$V_g$  = Volume do biogás no gasômetro, deslocado no manômetro ( $m^3$ );

$P_{abs}$  = Pressão do biogás fornecida pelo analisador de gases juntamente com a pressão da cidade de Itajubá (Pa);

$T_r$  = Temperatura do biogás (resistência colocada no reator)  $35^\circ C = 308,5 K$ .

### 3.3.9. Composição do biogás

Para a determinação dos componentes do biogás, foi empregado o medidor de gases GEM™ 5000 (Nº. série 501944), fabricado pela LandTec®. Esse aparelho portátil mede as concentrações de gases, por meio da detecção simultânea e contínua dos gases metano (%), dióxido de carbono (%), oxigênio (%), monóxido de carbono (ppm) e ácido sulfídrico (ppm). Na Tabela 11, mostra-se as faixas de leitura utilizadas nos cinco sensores do aparelho.

Tabela 11 - Características gerais do GEM 5000

Gases	Faixas de concentração	Tipo de sensor
CH <sub>4</sub>	0-100%	Infravermelho
CO <sub>2</sub>	0-100%	Infravermelho
O <sub>2</sub>	0-25%	Eletroquímico
H <sub>2</sub> S	0-500 ppm	Eletroquímico
CO	0-2000 ppm	Eletroquímico

Fonte: Adaptado do Manual Gem 5000 (2012)

### 3.3.10. Determinação da geração de metano e potencial de energia

Oliveira (1993) afirma que a produção diária de dejetos líquidos de suínos adultos produzidos é de 4,49 kg/dia, analisando-se para a quantidade média estimada da agroindústria em estudo, na qual possui um total de 1.300 suínos. Deste modo, a produção diária de dejetos, em kg/dia, é fornecida pela Equação 7.

$$\text{Produção diária de dejetos} \left( \frac{kg}{dia} \right) = 4,49 \times n^o \text{ de suínos da agroindústria} \quad (7)$$

Além disso, é importante considerar o cálculo da vazão diária, para obter o valor estimado a ser recebido na câmara do reator. Para tanto, considerou-se o nível de diluição médio de acordo com o tipo de granja, estabelecido na Tabela 6, que mostra a quantidade de dejetos, em litros por matriz.

A unidade de produção da fazenda é de ciclo completo (CC), ou seja, ela considera todas as fases do ciclo produtivo de suínos, do nascimento à engorda. A agroindústria em análise possui 86 matrizes.

Portanto, segundo os valores mostrados na tabela 5, e devido ao tipo de unidade produtiva da fazenda foi escolhido o valor médio de diluição (150 l/matriz), e junto com a quantidade de matrizes que possui a fazenda, é possível avaliar o volume de carga de dejetos, em litros por dia, através da Equação 8.

$$\text{Volume de carga diária } \left(\frac{l}{\text{dia}}\right) = \text{nível de diluição} \times n^{\circ} \text{ de matrizes} \quad (8)$$

O resultado obtido facilita o dimensionamento do volume da câmara do reator, conforme a Equação 9.

$$V_{\text{Biodigestor}} = V_C \times \text{TRH} \times \left(\frac{1}{1000}\right) \quad (9)$$

Onde:

$V_{\text{Biodigestor}}$  = Volume da câmara de biodigestão, em m<sup>3</sup>;

$V_C$  = Volume de carga (vazão diária de dejetos), em m<sup>3</sup>/dia;

TRH = Tempo de retenção hidráulica (dias) em que os despejos líquidos permanecem na unidade;

$\left(\frac{1}{1000}\right)$  = Conversão do valor, de volume, em litros para metros cúbicos.

De acordo com a Equação 10, pode se obter a estimativa da geração máxima de metano (CH<sub>4</sub>), em m<sup>3</sup>/dia.

$$\text{Geração máxima}_{\text{CH}_4} \left(\frac{m^3}{\text{dia}}\right) = \text{Produção}_{\text{diária bio gás}} \times C_{\text{CH}_4} \quad (10)$$

Onde:

Produção diária biogás = produção estimada de biogás em relação à quantidade em kg dos substratos;

$C_{CH_4}$  = Concentração máxima de metano no biogás obtida na unidade experimental;

A partir disso, por meio da Equação 11, foi possível estimar a produção máxima anual.

$$Produção\ máxima\ anual_{CH_4} = Q_{máxima\ diária\ CH_4} \times 365 \left(\frac{dias}{ano}\right) \quad (11)$$

Onde:

$Q_{máxima\ diária\ de\ CH_4}$  = vazão máxima diária de metano, em  $m^3/dia$ .

Mediante a Equação 12, foi estimado o potencial de energia passível de ser gerado com o uso de um motor de combustão interna.

$$P_{CH_4} = \left(\frac{Q_{Máxima\ diária\ CH_4}}{86400}\right) \times PCl \times \eta \times \left(\frac{1}{1000}\right) \quad (12)$$

Onde:

$P_{CH_4}$  = potencial de energia obtida mediante a geração de metano (MJ/dia);

$Q_{máxima\ diária\ de\ CH_4}$  = vazão máxima diária de metano ( $m^3/s$ );

$PCl$  = poder calorífico do metano de  $35,9 \cdot 10^6\ J/m^3$ , conforme Lora et al. (2016);

$\eta$  = rendimento do motor de combustão interna;

$\left(\frac{1}{1000}\right)$  = transformação de Watts para Kilowatts.

Considerou-se que o valor de rendimento do motor de combustão interna varia entre 20% a 30% (SOUZA, 2016). Nesse sentido, para o cálculo da geração de energia da pesquisa, considerou-se o maior valor da referência.

Para calcular a energia disponível anualmente, em KWh/ano, foi utilizada a Equação 13:

$$E = P \times f_c \times T_{\text{operação}} \quad (13)$$

Onde:

E = energia disponível anualmente, em kWh;

Fc = o fator de capacidade, valor adotado de 75%;

T<sub>operação</sub> = tempo de operação do motor, em número de horas por ano (18h.dia<sup>-1</sup>.365dias.ano<sup>-1</sup>).

Para efeito dos cálculos, considerou-se o valor de 75% correspondente em porcentagem ao funcionamento diário do sistema (18 horas ao dia)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os parâmetros considerados nas amostras da presente pesquisa, realizados antes e após o processo de digestão anaeróbia, das duas dosagens, para os processos de Batelada I e II, sendo o TRH de cada processo de 70 dias. Cabe ressaltar que os valores de saída são as médias simples dos resultados, já que foram feitas em triplicata.

### 4.1. Composição das Amostras

Os resultados consolidados das análises dos parâmetros da entrada e saída, ou seja, do afluente e efluente de M.1 e M.2 (8 e 12 g.L<sup>-1</sup> de magnetita adicionada nos dejetos de suínos, respectivamente), são apresentados em valores médias, já que foram analisadas em triplicata, conforme são expostos nas Tabelas 12 e 13, por cada batelada respectivamente.

Tabela 12 - Comparação dos Parâmetros Antes e Após a DA da Batelada I

Parâmetros	Batelada I				
	Entrada	M1		M2	
		Saída	Variação (%)	Saída	Variação (%)
pH	6,5	6,19	-5%	6,45	-1%
DQO (mgL <sup>-1</sup> )	24.853	9.317,0	-63%	7.787,0	-69%
DBO (mgL <sup>-1</sup> )	10.706	4.913,0	-54%	4.027,0	-62%
Nitrogênio Total (mgL <sup>-1</sup> )	217,0	1.059,0	80%	901,0	76%

Parâmetros	Batelada I				
	Entrada	M1		M2	
		Saída	Varição (%)	Saída	Varição (%)
Sólidos Totais (mgL <sup>-1</sup> )	49.420,0	8.610,0	-83%	3.600,0	-93%
Sólidos Totais Fixos (mgL <sup>-1</sup> )	8.190,0	2.320,0	-72%	1.100,0	-87%
Sólidos Voláteis (mgL <sup>-1</sup> )	41.230,0	6.290,0	-85%	2.490,0	-94%
Relação DQO:DBO	2,32	1,90	-18%	1,93	-17%

Tabela 13 - Comparação dos Parâmetros Antes e Após a DA da Batelada II

Parâmetros	Batelada II				
	Entrada	M1		M2	
		Saída	Varição (%)	Saída	Varição (%)
pH	6,15	6,80	10%	6,90	11%
DQO (mgL <sup>-1</sup> )	21.310,0	3.794,0	-82%	2.907,0	-86%
DBO (mgL <sup>-1</sup> )	17.588,5	2.430,0	-86%	2.088,0	-88%
Nitrogênio Total (mgL <sup>-1</sup> )	233,8	635,0	63%	597,0	61%
Sólidos Totais (mgL <sup>-1</sup> )	23.450,0	14.000,0	-40%	12.500,0	-48%
Sólidos Totais Fixos (mgL <sup>-1</sup> )	6.100,0	3.520,0	-42%	2.940,0	-52%
Sólidos Voláteis (mgL <sup>-1</sup> )	17.350,0	12.070,0	-30%	10.600,0	-39%
Relação DQO:DBO	1,20	1,60	25%	1,39	14%

Para uma análise gráfica das reduções dos parâmetros químicos das unidades experimentais, são apresentadas as Figuras 15 e 16, a partir dos dados dos processos sequenciais em batelada (I e II).

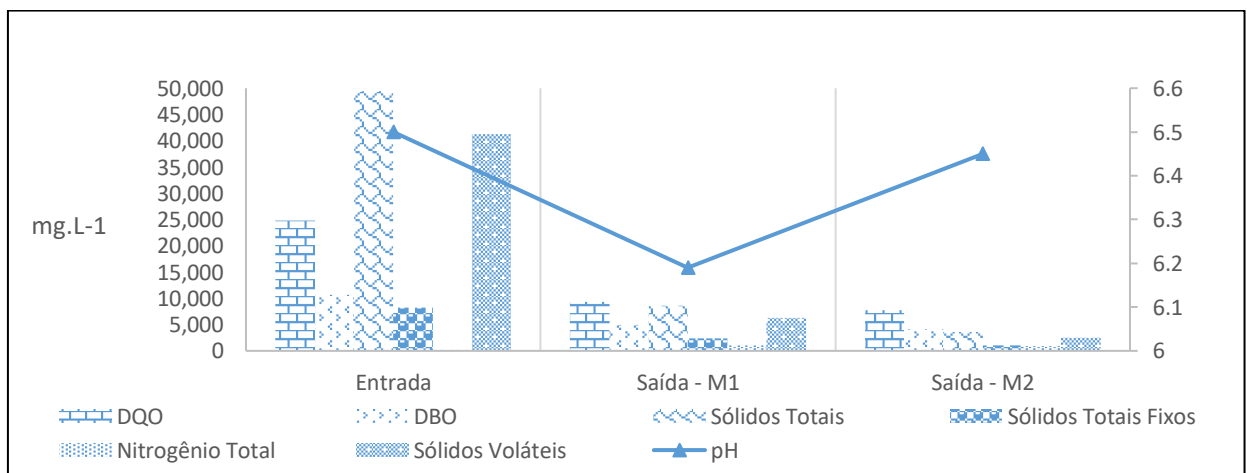


Figura 15 - Concentrações médias dos parâmetros químicos antes e depois da biodigestão durante a batelada I

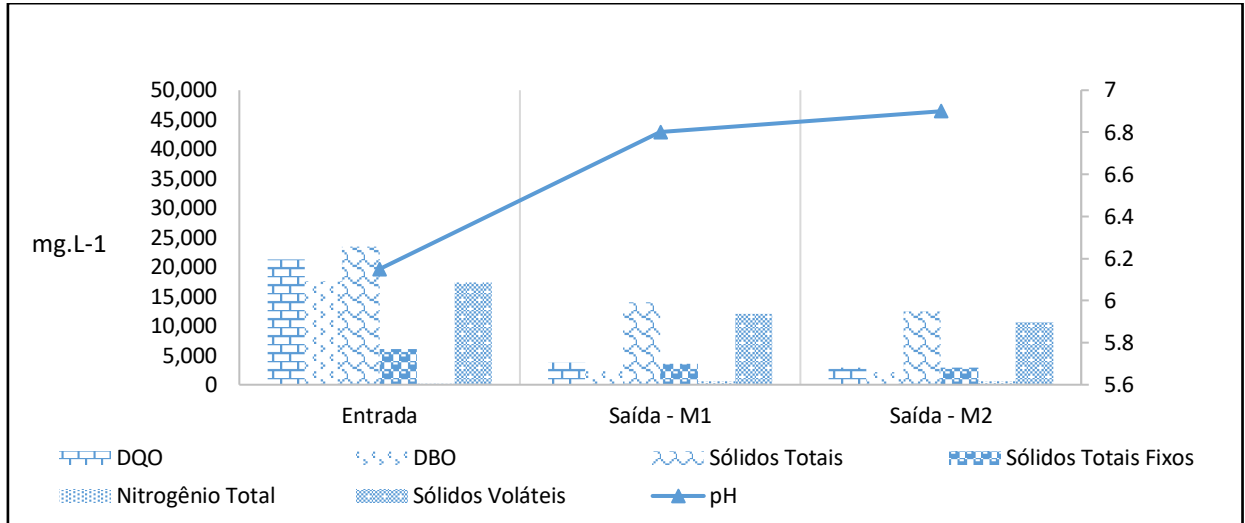


Figura 16 - Concentrações médias dos parâmetros químicos antes e depois da biodigestão durante a batelada II

De acordo com Chernicharo (1997), os valores de pH, situados no intervalo de 6,0 a 8,0, são favoráveis para o crescimento de micro-organismos metanogênicos. Nos experimentos realizados, os valores de pH, antes e após a biodigestão para ambas as concentrações (M.1 e M.2), estiveram no intervalo de 6,19 a 6,5 e de 6,15 a 6,90, respectivamente, comprovando o enquadramento dessa variável nas condições ótimas de operação para reatores anaeróbios.

A eliminação da fração orgânica é indicada por meio da análise de parâmetros, como DQO, DBO, SF, SV e ST, que foram avaliados nas reduções destes parâmetros durante o processo de biodigestão anaeróbia. Durante o processo da batelada I, a variável DQO apresentou médias de redução de 62,51% e 68,67% para os reatores M.1 e M.2, respectivamente. De maneira similar, os percentuais médios de redução também foram mais elevados no reator M.2 durante a batelada II, oscilando de 82,20% a 86,36% para M.1 e M.2 nessa ordem, mostrando que para os reatores M.2, em ambas as bateladas resultaram em uma maior redução de oxigênio necessária para oxidar a fração orgânica.

Com respeito ao valor do nitrogênio total, evidenciam que ambas as dosagens sofreram um acréscimo após a digestão anaeróbica, devido à oxidação anaeróbica por espécies nitrogenadas, causando assim, um equilíbrio dinâmico da redox de ferro e a variação de nitrogênio, concluindo que a compreensão do ciclo de ferro na AD, ainda precisa estudos adicionais, foram dados expostos na pesquisa de Yang et al (2018), mostrando as mudanças de nitrogênio e ferro

durante a DA do lodo ativado sob suplementos de três compostos de ferro,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e magnetita.

A concentração de matéria biodegradável presente na matéria orgânica, representada pela variável DBO, teve uma redução de 54,11% a 62,38% para as unidades experimentais M.1 e M.2, respectivamente, durante o processo da batelada I. Ao analisar os resultados obtidos no processo da batelada II, constata-se que os percentuais de redução foram mais significativos, atingindo-se valores de 86,18% e 88,13% respectivamente, para os reatores M.1 e M.2. Analisando os valores, mostra-se que em ambos os processos, as unidades experimentais M.2 tiveram maior diminuição na quantidade de matéria orgânica no efluente.

Com respeito aos percentuais de variação de SF para os reatores M.1 e M.2, constata-se uma redução média de 72% e 87%, respectivamente, durante o processo da batelada I, e os resultados alcançados no processo da batelada II foram de 42% e 52%. Em relação ao parâmetro ST, os valores de redução média para os reatores M.1 e M.2 oscilaram, entre 83% e 93%, respectivamente, no processo da batelada I, e 40% e 48% correspondentes ao processo da batelada II. Para o parâmetro SV, os percentuais de redução são similares, a redução média obtida foi de 85% para M.1 e de 94% para M.2 no processo batelada I e de 30% para M.1 e 39% para M.2 em relação ao processo da batelada II. Evidencia-se assim, que o maior valor de remoção dos sólidos foi realizado nos reatores de M.2.

Cabe indicar que a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia é afetada por alguns fatores que vão desde as condições ambientais, como temperatura, pressão e manejo do sistema até a composição química do substrato, como pH do meio, relação DQO/DBO e espécies de micro-organismos presentes no digestor. Braile e Cavalcanti (1993) consideram um resíduo facilmente biodegradável quando suas demandas química e bioquímica de oxigênio apresentam uma relação DQO/DBO menor que 2. Esta relação, no presente estudo, variou de 2,32 a 1,90 para os reatores M.1 e de 2,32 a 1,93 para os reatores M.2 durante o processo da batelada I, e de 1,2 a 1,6 para os reatores M.1 e de 1,2 a 1,9 para os reatores M.2 durante o processo da batelada II, considerando-se as análises de entrada e de saída para ambos os processos.

O trabalho realizado por Castro e Silva et al (2019), é empregado nesta pesquisa como parâmetro de controle, devido a que a investigação foi realizada em paralelo, tendo as mesmas condições operacionais, mostrando os valores da biodigestão a partir de dejetos de suínos sem aditivos. Os resultados obtidos se encontram no anexo A, onde pode-se evidenciar que a relação

DQO/DBO apresentou valores mais altos do que os resultados obtidos com a magnetita, denotando a influência do minério de ferro na biodegradabilidade do substrato. Os outros parâmetros físico-químicos estão dentro da faixa da composição, como pode-se mostrar na tabela 1.

#### 4.2. Volume corrigido na CNTP

Para as medições médias de biogás durante os processos das bateladas I e II para os reatores M.1 e M.2, foram aplicadas a todas as unidades experimentais as CNTP, obtendo os resultados expostos nas Tabelas 14 e 15, para as bateladas I e II, respectivamente.

Tabela 14 - Resultados da Batelada I de Volume, Pressão e Volume CNTP

<b>Protótipo Experimental</b>	V1 (m <sup>3</sup> )	P1 (Pa)	T0 (°K)	T1 (°K)	P <sub>0</sub> (Pa)	V <sub>0</sub> CNTP (m <sup>3</sup> )
M1	6.00 . 10 <sup>-4</sup>	100.142,80	293,25	308,15	101.325	5.64 . 10 <sup>-4</sup>
M2	6.20 . 10 <sup>-4</sup>	100.143,56	293,25	308,15	101.325	5.83 . 10 <sup>-4</sup>

Tabela 15 - Resultados da Batelada II de Volume, Pressão e Volume CNTP

<b>Protótipo Experimental</b>	V1 (m <sup>3</sup> )	P1 (Pa)	T0 (°K)	T1 (°K)	P <sub>0</sub> (Pa)	V <sub>0</sub> CNTP (m <sup>3</sup> )
M1	5,800.10 <sup>-04</sup>	100.140,60	293,25	308,15	101.325	5,46.10 <sup>-04</sup>
M2	6,100.10 <sup>-04</sup>	100.160,40	293,25	308,15	101.325	5,74.10 <sup>-04</sup>

Com respeito aos valores mostrados nas tabelas, pode-se observar que a unidade experimental M.2 apresentou maior deslocamento observado na mangueira, tendo maior resultado de pressão (100.143,56 Pa) e volume de produção de biogás normalizado (6.20. 10<sup>-4</sup> Nm<sup>3</sup>), representando um aumento de produção de biogás de 3.26% em relação à unidade experimental M.1. Assim sendo, no processo da batelada II, o volume de produção normalizado foi de 6,10. 10<sup>-4</sup> Nm<sup>3</sup> e pressão igual a 100.160,40 Pa, indicando um aumento do volume gerado de 4,88% em relação ao reator M.1.

Os resultados evidenciados no reator M.2 alcançaram maiores percentuais de redução dos constituintes orgânicos e as maiores frações de biodegradabilidade, denotando-se maior eficiência em uma escala piloto. Apesar disso, é necessário ressaltar que, embora os valores



gerados sejam pequenos, esses valores representam um experimento em escala laboratorial de um reator com apenas 2,16 litros de volume total. Nesse sentido, destaca-se que, em escalas reais, a diferença seria consideravelmente maior.

Para determinar a geração de biogás a partir dos substratos analisados das unidades experimentais (UEs), são apresentadas as Tabelas 16 e 17, em que são mostradas as quantidades - em litros - de biogás gerado por dia, litros de metano gerados por cada litro de substrato utilizado, e volume de metano (em m<sup>3</sup>) por volume de substrato (em m<sup>3</sup>) para os processos das bateladas I e II. Além disso, também são expostos os rendimentos de metano (Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>) sob outros parâmetros importantes, como kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV. Para a realização dos cálculos, estimou-se uma densidade de lodo de 1,020 kg.m<sup>-3</sup> (DARTORA et al, 1998).

Tabela 16 - Rendimento de metano por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV no processo da batelada I

Amostra	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV				
	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg substrato	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg DQO	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg DBO	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg ST	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg SV
M.1	1,77.10 <sup>-2</sup>	1,16.10 <sup>-2</sup>	3,12.10 <sup>-2</sup>	4,44.10 <sup>-3</sup>	5,18.10 <sup>-1</sup>
M.2	1,35.10 <sup>-2</sup>	8,10.10 <sup>-3</sup>	2,07.10 <sup>-2</sup>	3,02.10 <sup>-2</sup>	3,57.10 <sup>-1</sup>

Tabela 17 - Rendimento de metano por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV no processo da batelada II

Amostra	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> por kg de substrato, DQO, DBO, ST e SV				
	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg substrato	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg DQO	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg DBO	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg ST	Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kg SV
M.1	1,97.10 <sup>-2</sup>	1,15.10 <sup>-2</sup>	1,33.10 <sup>-2</sup>	2,13.10 <sup>-2</sup>	3,82.10 <sup>-1</sup>
M.2	1,44.10 <sup>-2</sup>	8,00.10 <sup>-3</sup>	9,51.10 <sup>-3</sup>	1,35.10 <sup>-2</sup>	2,18.10 <sup>-1</sup>

Os cálculos foram realizados com base nas medidas dos volumes de biogás gerados e os valores dos constituintes orgânicos obtidos nos experimentos durante ambas as bateladas. De acordo com os resultados alcançados, os reatores M.2 obtiveram maior produção volumétrica de biogás, porém os reatores M.1 forneceram maiores incrementos de produções normalizadas de metano (1,77 . 10<sup>-2</sup> e 1,97 . 10<sup>-2</sup> Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg substrato), revelando uma média de rendimento de 52,0% e 59,80% nos processos I e II respectivamente, em contrapartida à média de 38,40% e 41,60% dos reatores M.2 em ambos os processos.

Portanto, com respeito à dosagem do M.1 utilizada nesse estudo, pode-se afirmar que a mesma contribuiu para um maior sucesso no processo de metanogênese, em contrapartida do M.2 e o parâmetro de controle da pesquisa de Castro e Silva et al (2019), além de mostrar que o valor alcançado com a adição de magnetita foi de  $0,38 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$ , está acima dos valores da capacidade de produção máxima de metano para suínos expostos no Anexo E.

### 4.3. Composição do biogás

#### 4.3.1. Resultados do processo de Batelada I

O processo de batelada I foi realizado a partir do dia 12/03/2018 e foram definidas 06 datas de leitura, no período de 70 dias. A Tabela 18 apresenta o valor do maior rendimento de metano obtido nos reatores M.1 e M.2, e para uma representação gráfica com base nos gases gerados, em média, pode-se observar as Figuras 17 e 18, respectivamente. Para visualizar a tabela completa pode-se encontrar no Apêndice A.

Tabela 18 - Resultados M.1 e M.2 do maior rendimento de metano registrado na Batelada I

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH <sub>4</sub> (%)	Média CH <sub>4</sub> (%)	Desvio padrão CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	Média CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Média O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Média H <sub>2</sub> S (ppm)
M.1	15/05/2018	UE1	53,8	52,0	8,1	42,5	41,6	3,2	3,0	4	6,3	60	85,6
		UE2	42,5			52,6		0,6		12		117	
		UE3	58,7			29,8		5,4		3		80	
M.2	15/05/2018	UE1	27,2	38,4	7,9	23,6	26,6	11,9	0,9	1	1,7	27	12,7
		UE2	44,4			33,5		1,5		3		7	
		UE3	43,5			22,8		8,7		1		4	

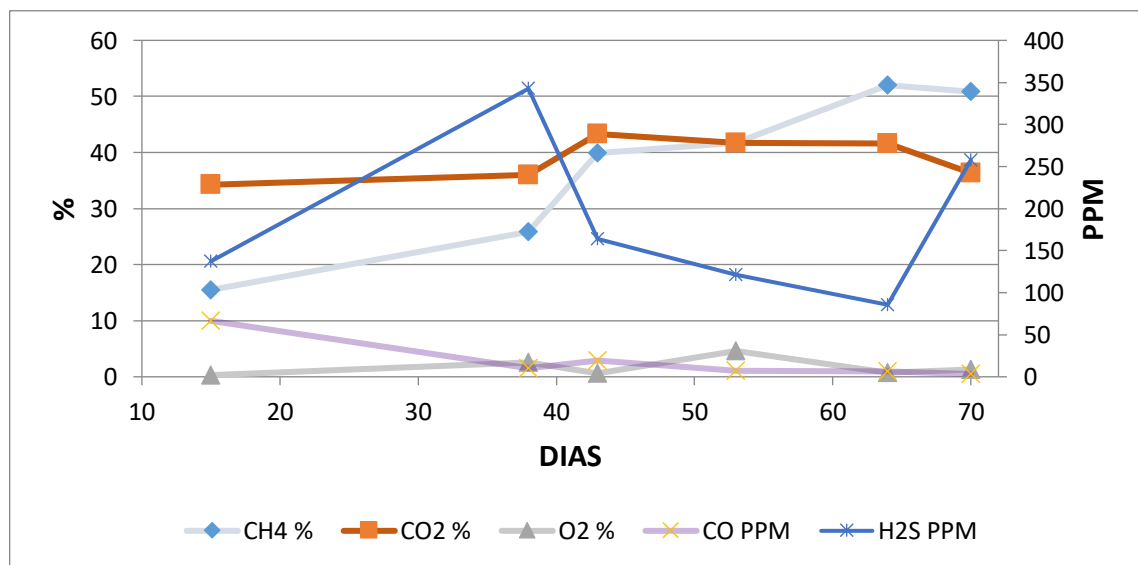


Figura 17 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.1 para o processo de batelada I

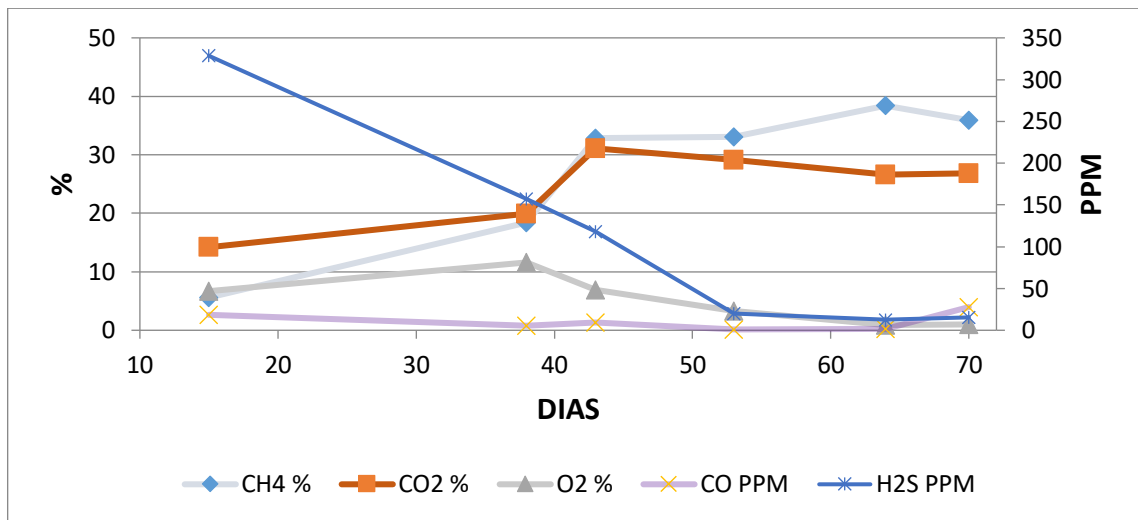


Figura 18 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.2 para o processo de batelada II

Em referência aos resultados de cada unidade experimental, foram estimadas as médias dos valores das concentrações realizadas em triplicata, dos elementos CH<sub>4</sub> (%), CO<sub>2</sub> (%), O<sub>2</sub> (%), CO (ppm) e H<sub>2</sub>S (ppm).

Levando-se em consideração que as maiores concentrações de gás CH<sub>4</sub> contribuem para um maior aproveitamento energético (JIANG et al, 2013; DENG et al, 2014), é importante indicar que, no processo de batelada I, os valores médios de CH<sub>4</sub> registraram percentuais máximos de 52,0% e de 38,40%, com um desvio padrão de +/- 8,1 e +/- 7,9 para os reatores M.1 e M.2, respectivamente. No que tange às concentrações médias de CO<sub>2</sub>, os valores de leitura forneceram concentrações médias de 41,60% e 26,60% para ambos os reatores mutuamente.

Além disso, os valores das baixas concentrações de oxigênio constataam uma maior atuação das arqueas metanogênicas e evidenciam o controle de geração de H<sub>2</sub>S (OELGESCHLÄGER & ROTHER, 2008; WRESTAE & SAEPUDIN, 2013).

#### 4.3.2. Resultados do processo de Batelada II

O processo de batelada II foi realizado a partir do dia 15/06/2018 e foram definidas 09 datas de leitura, atingindo o mesmo tempo hidráulico de retenção da batelada I. A Tabela 19 apresenta o valor do maior rendimento de metano obtidos nos reatores M.1 e M.2, e para uma

representação gráfica com base nos gases gerados, em média, pode-se observar as Figuras 19 e 20, respectivamente. Para visualizar a tabela completa dos gases pode-se encontrar no Apêndice B.

Tabela 19 - Resultados M.1 e M.2 do maior rendimento de metano registrado na Batelada I

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH4 (%)	Média CH4 (%)	Desvio padrão CH4 (%)	CO2 (%)	Média CO2 (%)	O2 (%)	Média O2 (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H2S (ppm)	Média H2S (ppm)
M.1	02/08/2018	UE1	57,0	59,8	5,2	39,9	37,0	0,1	1,0	3,0	3,3	48,0	32,7
		UE2	55,3			42,2		0,7		3,0		50,0	
		UE3	67,0			28,8		2,3		4,0		0,0	
M.2	02/08/2018	UE1	61	41,6	17,5	34,5	31,4	4,5	2,5	2	1,0	7	9,7
		UE2	18,5			26,8		2,1		0		22	
		UE3	45,2			32,8		1		1		0	

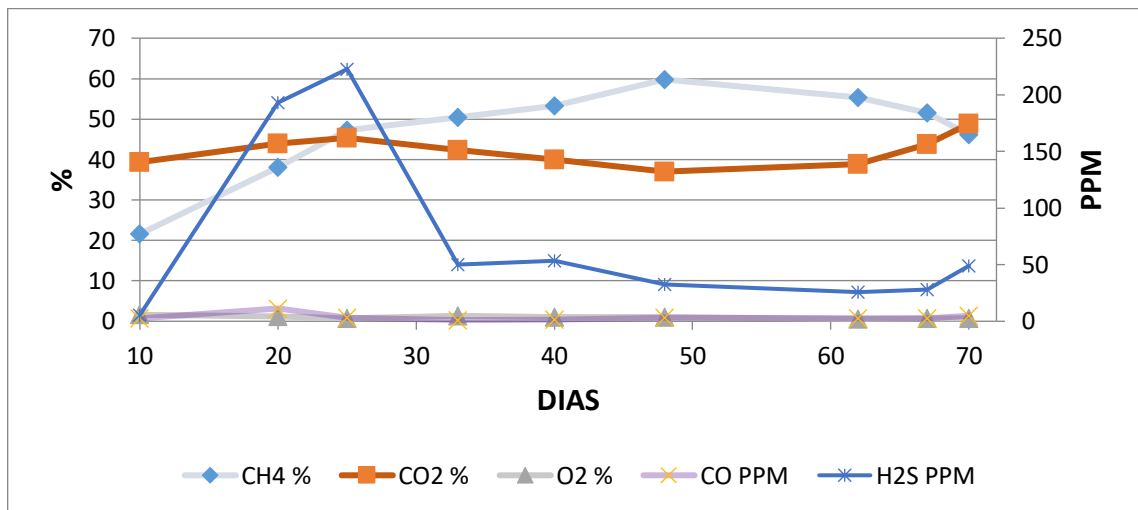


Figura 19- Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.1 para o processo de batelada II

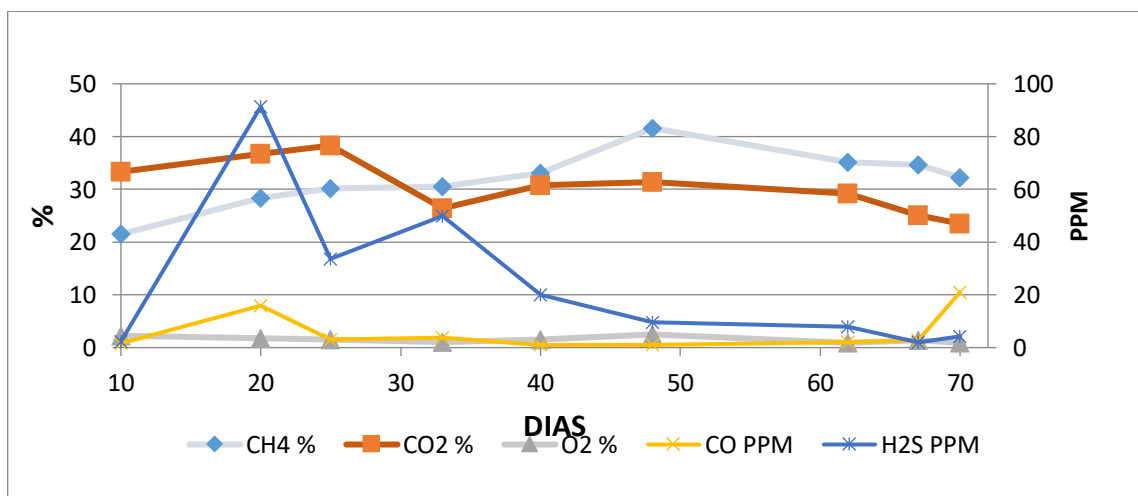


Figura 20 - Composição do biogás gerado pela unidade experimental M.2 para o processo de batelada II

No caso da Batelada II, os valores médios de CH<sub>4</sub> registraram percentuais máximos de 59,8% e de 41,60%, com um desvio padrão de +/- 5,2 e +/- 17,5 para os reatores M.1 e M.2, respectivamente. Ao analisar-se o gás CO<sub>2</sub>, os valores médios obtidos foram de 37,0% e 31,40% para ambos os reatores. Em conclusão, é necessário ressaltar que as maiores concentrações médias de gás CH<sub>4</sub> correspondem aos reatores do M.1 em ambos os processos de bateladas.

Conforme os resultados atingidos por Castro e Silva et al (2019), a produção de metano proveniente do processo de digestão anaeróbia de dejetos de suínos, considerando-se o mesmo TRH, alcançou concentrações máximas de 33,40% e 45,25% durante os processos de bateladas, tais como pode-se observar no Anexo B os percentuais médios dos experimentos realizados em duplicata. Além disso, cabe indicar que o comportamento dos gases nos reatores M.1 e M.2 de batelada I e II, constata uma maior produção estável durante os processos de DA sob efeito do pó de magnetita.

#### 4.4 Análise de metais pesados para os processos de Bateladas I e II

Mediante o equipamento *SpectrAA Software*, ou seja, por meio de espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS), foram realizadas as análises de metais pesados. Scherer et al (1983) descrevem que os elementos de Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Cobre (Cu), são componentes essenciais que influenciam nas atividades enzimáticas dos organismos metanogênicos, otimizando a produção do metano no biogás.

As concentrações dos metais pesados considerados na pesquisa, presentes nos reatores M.1 e M.2, em mg/l, durante os processos de batelada I e II, são apresentadas nas tabelas 20 e 21, respectivamente. Para efeito de análises, foram considerados os valores médios das unidades experimentais, antes e após o período de biodigestão, para ambos os processos.

Tabela 20 - Resultados das análises de metais pesados para o processo de Batelada I

Metais Pesados	Entrada	M.1	M.2
	(mg/L)	Saída (mg/L)	Entrada (mg/L)
Ferro	8,21	6,62	5,51
Zinco	0,62	1,19	0,70
Manganês	15,31	3,33	8,88
Cobre	0,00	0,13	0,02

Tabela 21 - Resultados das análises de metais pesados para o processo de Batelada II

Metais Pesados	Entrada	M.1	M.2
	(mg/L)	Saída (mg/L)	Entrada (mg/L)
Ferro	8,21	7,35	7,60
Zinco	0,62	3,95	4,89
Manganês	15,31	0,76	0,78
Cobre	0,00	0,54	0,80

Conforme a literatura das pesquisas atuais descritas no item 2.4.7.9, as concentrações dos resultados de M.1 e M.2 nos processos de batelada I e II se encontram dentro dos limites para serem utilizadas na agricultura, para serem empregadas como fertilizantes, evidenciando que as concentrações de saída, após os processos de digestão, mostra uma redução de valores em relação à entrada, reduzindo o risco de doenças.

Porém, é importante indicar que as oscilações nas concentrações dos metais pesados são passíveis de ocorrência, em razão das características operacionais do processo, como valores de pH, TRH, temperatura, entre outros. Nesse sentido, é necessário o controle do processo para que os resultados alcançados não ultrapassem os padrões limite estabelecidos pela literatura e resolução e legislação pertinentes (CASTRO & SILVA et al, 2019).

#### **4.5. Avaliação do potencial energético**

Após os cálculos realizados, pode-se afirmar que a produção da fazenda em pesquisa produz 98,10 Nm<sup>3</sup> de biogás.dia<sup>-1</sup>, resultando uma produção de 35.806,50 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

A partir das análises das unidades experimentais, estimou-se que a produção máxima de CH<sub>4</sub> é de 58,86 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> (Equação 10), gerando um volume anual de 121.483,9 Nm<sup>3</sup> (Equação 11), obtendo uma potência instalada de 7,33 kW (Equação 12). Resulta assim em uma geração de 32.136,33 kWh/ano (Equação 13), enquadrando-se segundo as considerações de microgeração distribuída, que deve ser igual ou inferior a 75 kW, de acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

O presente trabalho teve como finalidade mostrar os efeitos do pó de magnetita, considerando-se a dosagens de 8,0 e 12,0 g.L<sup>-1</sup>, adicionadas nas unidades experimentais sequenciais do tipo batelada, no tratamento de dejetos de suínos da fazenda localizada em Cachoeira de Minas (MG), avaliando o potencial da produção de biogás no processo de biodigestão anaeróbia. As dosagens em estudo demonstraram maiores valores de remoção dos constituintes orgânicos avaliados e controle da variação de elementos-traço para operação da planta de digestão anaeróbia, em comparação ao sistema sem aditivos, eliminando assim, o risco de inibição de micro-organismos metanogênicos.

Durante o processo de biodigestão nas unidades experimentais, apresentou-se uma produção de metano maior nos reatores M.1 durante o processo sequencial II, que resultaram um rendimento médio de 59,8% de CH<sub>4</sub> e uma geração máxima de 3,82 x 10<sup>-1</sup> Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. Porém, os reatores correspondentes à M.2 alcançaram os maiores volumes de biogás, quer dizer, que gerou valores mais altos em outras concentrações, exceto no gás metano.

De acordo com os resultados experimentais, o sistema geraria uma produção de 98,10 Nm<sup>3</sup> de biogás/dia, correspondendo a uma produção anual de 35.806,50 m<sup>3</sup>/ano. Esses valores correspondem à produção de 58,86 m<sup>3</sup>/dia de metano, sendo equivalente à produção de 21.483,90 m<sup>3</sup>/ano.

Segundo a avaliação do potencial energético da fazenda, a potência instalada é verificada como microgeração distribuída, mediante os parâmetros estabelecidos pela Resolução Normativa nº 687 da ANEEL (2015), mostrando o valor de 7,33 kW.

Portanto, pode-se concluir que o projeto de aproveitamento energético de biogás proveniente dos dejetos da suinocultura com o aditivo do minério de ferro na dosagem de 8,0 g.L<sup>-1</sup> de dejetos, evidencia melhor produção de metano e remoção de matéria orgânica, em contrapartida com resultados da suinocultura sem aditivos, como a pesquisa de Castro e Silva et al (2019) avaliado como parâmetro de controle por ser realizado nas mesmas condições operacionais, além dos dados expostos pela Embrapa no ano 2018, relacionado com a capacidade de produção de metano máxima para suínos.

## 5.2. Recomendações

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa, foram analisadas algumas recomendações para trabalhos futuros relacionados ao tema da suinocultura com o aditivo do minério de ferro.

Algumas delas são:

- Devido à alta produção do setor da suinocultura, há um grande volume de dejetos suínos, sendo necessária a busca de novas tecnologias de tratamento que reduzam os impactos ambientais gerados;
- Sugere-se realizar maiores estudos acerca dos impactos e efeitos de outros aditivos e/ou cossustratos durante a digestão anaeróbia, para sua expansão em empreendimentos agropecuários brasileiros;
- Devem ser investigadas novas matérias-primas que propiciem a otimização e a difusão do processo de DA a um baixo custo.



## APÊNDICE A – Resultados M.1 e M.2 das medições do biogás gerado pelos biodigestores da Batelada I

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH4 (%)	Média CH4 (%)	Desvio padrão CH4 (%)	CO2 (%)	Média CO2 (%)	O2 (%)	Média O2 (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H2S (ppm)	Média H2S (ppm)	BAL (%)
M1	27/03/2018	UE1	20,2	15,5	8,3	39,2	34,25	0,3	0,3	17	66,5	166	137	49,9
		UE2	11,0			29,3		0,3		116		108		
		UE3	0,0			2,2		19		0		0		
	05/07/2018	UE1	31,5	25,9	4,2	32	36,03	0,4	2,5	16	10,3	466	342,6	35,6
		UE2	21,4			50,8		0,9		12		262		
		UE3	24,9			25,3		6,1		3		300		
	10/07/2018	UE1	48,3	40	12,6	37	43,3	1	0,6	16	19	188	164,3	16,1
		UE2	22,1			55,2		0,3		25		113		
		UE3	49,4			37,8		0,4		16		192		
	18/07/2018	UE1	48,6	40	11,1	43,4	43,3	0,3	4,6	9	7,3	168	121,6	12,1
		UE2	24,0			56,8		1		12		140		
		UE3	46,5			30,9		12,5		1		57		
	02/08/2018	UE1	53,8	52,0	8,1	42,5	41,6	3,2	3,0	4	6,3	60	85,6	3,4
		UE2	42,5			52,6		0,6		12		117		
		UE3	58,7			29,8		5,4		3		80		
	16/08/2018	UE1	49,2	50,9	1,3	40,9	36,4	0,8	1,3	4	3,3	371	257,3	11,4
		UE2	51,2			41,5		0,3		4		335		
		UE3	52,3			26,7		2,9		2		66		
M2	25/06/2018	UE1	2,2	5,6	3,9	11,9	14,23	12,9	6,7	8	18,5	428	328,5	73,5
		UE2	9,1			30,8		0,6		29		229		
		UE3	0,0			3,3		18,6		0		7		
	05/07/2018	UE1	7,0	18,4	10,5	10,9	19,9	15,2	11,6	5	5,7	386	157,3	50,1
		UE2	32,3			34,1		10,7		10		81		
		UE3	16,0			14,7		8,9		2		5		
	10/07/2018	UE1	18,8	32,9	10,6	19,2	31,1	13,9	6,9	2	9	113	118,3	29,1
		UE2	44,2			43		0,5		20		125		
		UE3	35,7			31,2		6,2		5		117		
	18/07/2018	UE1	28,2	31,4	2,7	33,1	29,1	16,9	3,3	0	1,0	7	20,3	34,5
		UE2	34,9			24		10,8		2		12		
		UE3	31,2			30,3		12,1		1		42		
	02/08/2018	UE1	27,2	38,4	7,9	23,6	26,6	11,9	0,9	1	1,7	27	12,7	34,1
		UE2	44,4			33,5		1,5		3		7		
		UE3	43,5			22,8		8,7		1		4		
	16/08/2018	UE1	30,0	35,9	4,9	28,5	26,8	15,2	1,0	0	27,7	4	15,3	36,3
		UE2	35,8			28,7		1,3		80		42		
		UE3	41,9			23,3		0,6		3		0		

## APÊNDICE B – Resultados M.1 e M.2 das medições do biogás gerado pelos biodigestores da Batelada II

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH4 (%)	Média CH4 (%)	Desvio padrão CH4 (%)	CO <sub>2</sub> (%)	Média CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Média O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Média H <sub>2</sub> S (ppm)	BAL (%)
M1	25/06/2018	UE1	29,0	21,6	5,2	42,0	39,3	2,0	1,6	4,0	2,3	6,0	5,6	37,5
		UE2	17,9			40,0		2,0		3,0		8,0		
		UE3	18,0			35,9		1,0		0,0		3,0		
	05/07/2018	UE1	52,5	38,1	11,1	37,2	43,9	2,8	1,2	9,0	11,3	106,0	193,0	16,8
		UE2	36,3			49,5		0,3		18,0		459,0		
		UE3	25,4			45,2		0,4		7,0		14,0		
	10/07/2018	UE1	53,0	47,3	4,7	43,4	45,3	0,5	0,7	3,0	3,3	163,0	222,7	6,7
		UE2	41,5			47,3		0,2		5,0		455,0		
		UE3	47,4			45,3		1,3		2,0		50,0		
	18/07/2018	UE1	55,5	50,5	4,9	38,6	42,3	1,0	1,3	1,0	1,0	46,0	50,0	5,8
		UE2	43,9			45,8		1,3		0,0		22,0		
		UE3	52,1			42,6		1,7		2,0		82,0		
	25/07/2018	UE1	56,3	53,2	2,2	37,5	39,9	1,0	1,1	1,0	1,3	63,0	53,7	5,7
		UE2	51,7			41,2		1,8		1,0		98,0		
		UE3	51,7			41,1		0,5		2,0		0,0		
	02/08/2018	UE1	57,0	59,8	5,2	39,9	37,0	0,1	1,0	3,0	3,3	48,0	32,7	2,2
		UE2	55,3			42,2		0,7		3,0		50,0		
		UE3	67,0			28,8		2,3		4,0		0,0		
	16/08/2018	UE1	47,0	55,3	6,4	47,1	38,9	1,1	0,6	1,0	2,3	22,0	26,0	5,3
		UE2	56,1			37,4		0,4		4,0		0,0		
		UE3	62,7			32,1		0,3		2,0		56,0		
	21/08/2018	UE1	46,2	51,5	4,2	48,8	43,8	0,3	0,7	3,0	2,7	46,0	28,0	4,0
		UE2	51,7			42,3		0,5		3,0		32,0		
		UE3	56,6			40,4		1,2		2,0		6,0		
24/08/2018	UE1	42,3	46,1	5,2	56,0	48,8	0,3	0,7	6,0	5,0	77,0	49,0	4,4	
	UE2	42,6			54,9		0,7		6,0		68,0			
	UE3	53,4			35,6		1,0		3,0		2,0			
M2	25/06/2018	UE1	27,2	21,5	6,6	32	33,3	0,5	2,2	3	1,7	1	2,3	43,0
		UE2	12,2			38		5		0		4		
		UE3	25,1			30		1		2		2		
	05/07/2018	UE1	45,3	28,4	12,8	49,3	36,7	1,2	1,8	33	16,0	184	91,3	33,1
		UE2	14,4			30,9		1,2		13		43		
		UE3	25,6			29,9		3		2		47		
	10/07/2018	UE1	49,2	33,2	11,3	45,7	38,3	2,1	1,5	5	3,0	8,1	33,7	26,9
		UE2	24,6			41,1		2		2		82		
		UE3	25,8			28,2		0,5		2		11		
	18/07/2018	UE1	52,9	30,2	16,1	43,1	26,4	1,5	1,0	3	3,7	98	50,0	42,4
		UE2	16,9			16		0,3		4		1		
		UE3	20,8			20,2		1,1		4		51		
	25/07/2018	UE1	59,1	33,1	18,5	29,9	30,8	3	1,5	2	1,0	12	20,0	34,6
		UE2	18			25,4		1		1		0		
		UE3	22,2			37,1		0,5		0		48		
	02/08/2018	UE1	61	41,6	17,5	34,5	31,4	4,5	2,5	2	1,0	7	9,7	24,5
		UE2	18,5			26,8		2,1		0		22		
		UE3	45,2			32,8		1		1		0		
	16/08/2018	UE1	48,2	35,1	10,3	42,2	29,2	0,8	0,9	3	2,0	7	8,0	34,7
		UE2	22,9			20,1		0,8		2		1		
		UE3	34,2			25,4		1,2		1		16		
	21/08/2018	UE1	54,9	34,6	18,8	40,1	25,1	3,2	1,4	2	2,7	6	2,0	38,9
		UE2	9,6			12,4		1		5		0		
		UE3	39,2			22,8		0,1		1		0		
24/08/2018	UE1	53,0	32,2	15,4	39,2	23,5	0,3	0,9	2	21,0	9	4,3	43,5	
	UE2	16,1			16,2		1,7		60		1			
	UE3	27,4			15,1		0,6		1		3			

## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa N° 235 de 2006**. Brasília, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa N° 482 de 2012**. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações da Geração (BIG)**, 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 17 nov. 2019

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado Pela Digestão Anaeróbia de Resíduos**. 2000. 165 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

AMANI, T.; NOSRATI, M.; SREEKRISHNAN, T. **Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects: A review**. Environmental Reviews, v.18 p. 255-278, 2010.

AMARAL, A. L.; et al. **Boas Práticas de Produção de Suínos**. Circular Técnica -50. Concórdia: EMBRAPA, 2004.

AMON, T.; et al. **Biogas production from maize and dairy cattle manure Influence of biomass composition on the methane yield**. Agriculture, Ecosystems & Environment v. 118, n1- 4, p.173-182, 2007.

ANGELIDAKI, I.; KARAKASHEV, D.; BATSTONE, D. J.; PLUGGE, C. M.; STAMS, A. J. M. **Biomethanation and its potential**. Methods in Enzymology. 494, p. 327-351, 2011.

ANGONESE, A.R.; CAMPOS, A.T.; WELTER, R.A. **Potencial de redução de emissão de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor**. Engenharia Agrícola, v.27, n.3, p.648-657, 2007.

ANTONELLI, J. **Gestão dos resíduos de suinocultura no município de Missal**. 2013. 32p. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2013.

ASTALS, S.; NOLLA-ARDÈVOL, V.; MATA-ALVAREZ, J. **Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: biogas and digestate** Bioresource Technology, v.110, p. 63-70, 2012.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

AULENTA, F.; ROSSETTI, S.; AMALFITANO, S.; MAJONE, M.; and TANDOI, V. 2013. **Conductive magnetite nanoparticles accelerate the microbial reductive dechlorination of trichloroethene by promoting interspecies electron transfer processes**. ChemSusChem 2013, 6:, 433 – 436. doi: 10.1002/cssc.201200748

AZARGOSHASB, H.; et. al. **Three-phase CFD simulation coupled with population balance equations of anaerobic syntrophic acidogenesis and methanogenesis reactions in a**

**continuous stirred bioreactor.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry v. 27, p. 207-217, 2015.

BACENETTI, J.; SALA, C.; FUSI, A.; & FIALA, M. (2016). **Agricultural anaerobic digestion plants: what LCA studies pointed out and what can be done to make them more environmentally sustainable.** Applied Energy, 179, 669–686.

BAGHER, A.M.; FATEMEH, G.; SAMAN, M.; LEILI, M.M. **Advantages and disadvantages of biogas energy.** Bulletin of Advanced Scientific Research. v.1, n.5, 2015.

BRASIL. **Decreto nº 2003, de 10 de setembro de 1996.** Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências. Brasília, 1996. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/legislacao/dec19962003.PDF>>. Acesso em 18 Nov. 2018

BRASIL. **Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.** Probiogás. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Oliver Jende et al – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 83 p.

BANIK, S.; BANDYOPADHYAY, S.; GANGULY, S.; DAN, D. **Effect of microwave irradiated Methanosarcina barkeri DSM-804 on biomethanation.** Bioresource Technology. v.97, n.6, p.819-823, 2006.

BARROS, R. M. **Tratado de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: Interciência. 374p., 2012

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2013.

BATSTONE, D. J.; JENSEN P. D. **Anaerobic Processes.** Earth Systems and Environmental Sciences, p. 615-639, v.44, 2011.

BELLI FILHO, P.; CASTILHOS JÚNIOR, A.B.; COSTA, R.H.R.; SOARES, S.R.; PERDOMO, C.C. **Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.1, p.166-70, 2001.

BENEDI, J. M. H. **El ambiente de los alojamientos ganaderos. Madrid: Ministerio de la Agricultura, Pesca y Alimentación, Servicio de Extensión Agraria,** 1986. 28 p. (Hojas Divulgadoras, 6).

BISCHOFBERGER, W.; DICHTL, N.; ROSENWINKEL, H.; SEYFRIED, C.; BÖHNKE, B. **Anaerobtechnik Acta hydrochim. Hydrobiol,** v. 33, n.3, 2005.

BLEY JÚNIOR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da Biomassa Residual: Perspectivas Energéticas, Socioeconômicas e Ambientais.** 2. ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas Para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik, 2009.

BLEY JR, C. **Biogás: a energia invisível.** 2ª ed. São Paulo, 2015. 178p.

BLUEMLING, B.; MOL, A. P. J.; TU, Q. **The social organization of agricultural biogas production and use.** Energy Policy, v. 63, p. 10-17, 2013

- BRAILE, P. M. & CAVALCANTI J. E.W.A. **Manual de tratamento de águas residuárias industrial**. São Paulo: CETESB, 1993. 764P.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, **Resolução Nº 685, de 29 de junho de 2017**, DO 30 de junho de 2017, Brasil, 2017. Disponível em: Acesso em: 05 oct. 2017
- BRASIL. Lei nº 12.187 (2009, 29 de dezembro). Institui a **Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC** e dá outras providências. Diário Oficial da União
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>. Acesso em: 25/07/2018.
- CAILLOT, V. A. **Avaliação do potencial de produção de biogás dos resíduos da suinocultura codigeridos com resíduos da agricultura brasileira**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.
- CAMPOS, C. M. M.; DAMASCENO, L. H. S.; MOCHIZUKI, E. T.; BOTELHO, C. G. **Avaliação do desempenho do reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em escala laboratorial na remoção da carga orgânica de águas residuárias da suinocultura**. Ciência e Agrotecnologia, v.29, n.2, p.390-399, 2005
- CASTRO E SILVA, H. L.; CÓRDOVA, M. E. H.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G. L.; LORA, E. E. S.; SANTOS, A. H. M.; SANTOS, I. F. S.; BOTAN, M. C. C.; PEDREIRA, J. R.; FLAUZINO, B.K. 2019. **An agroindustry technical and economic evaluation of biogas production from swine manure in in Southern Minas Gerais, Brazil**. Submitted to Renewable and Sustainable Energy Reviews in April/2019. Under review.
- CAÑOTE, S. J. B. **Life Cycle Assessment and Energy Utilization of Biogas Generation from UASB Sludge and Activated Sludge**. Dissertation (Master's in Energy Engineering) - Federal University of Itajubá, 2018.
- CAZIER, E. A.; et al. **Biomass hydrolysis inhibition at high hydrogen partial pressure in solid-state anaerobic digestion**. Bioresource Technology v. 190, p.106-113, 2015.
- CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. 104 f. Rio de Janeiro. Qualitymark. 1998.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte/MG, 1997. 5 v. 246p.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. 2ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2da edição, v. 5, 380 p. 2007.
- CEEETA (2015). “Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos”. Disponível em <http://www.marioloureiro.net/tecnica/energProdu/TecnoMicroGeraCEEETA.pdf> Aceso em 15/12/2018
- CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA - CCE. Guia Técnico de Biogás. Amadora: Portugal, 2000.

COELHO, S. T. et al. **A conversão da fonte renovável biogás em energia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (CBPE), 5., 2006, Brasília.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Aterro: Geração de Biogás e uso energético, versão 1.0 / CETESB**. Departamento ambiental, Ministério brasileiro de ciência e tecnologia. São Paulo, 2006: SMA: CETESB: MCT. CD-ROM. Manual do usuário v. 1-2.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Pós-Graduação em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, R. V. G. **Taxa de Geração de Resíduos da Construção Civil em Edificações na Cidade de João Pessoa**. João Pessoa, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco, João Pessoa, 2012.

CRUZ VIGGI, C., ROSSETTI, S., FAZI, S., PAIANO, P., MAJONE, M., AND AULENTA, F. (2014). **Magnetite particles triggering a faster and more robust syntrophic pathway of methanogenic propionate degradation**. *Environ. Sci. Technol.* 48, 7536–7543. doi: 10.1021/es50167

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. **Manejo de dejetos de suínos**. Boletim Informativo BIPERS, v.7, n.11, p.4-33, 1998.

DEBOWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; BRUDNIAK, A. **Effect of magneto-active filling on the effectiveness of methane fermentation of dairy wastewaters**. *International Journal of Green Energy*. 2014.

DEMIREL B., SCHERER P., (2011). **Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane**. *Biomass Bioenergy* 35:992–998

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Ed. Wiley – VCH, 2011.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Boletim Informativo - BIPERS, v.10, n.14, p.4-28, 2002

DENG Y.; XU, J.; LIU, Y.; MANCL K. **Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014; 35:294-303.

DEUBLEIN D, STEINHAUSER A (2011) **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. Weinhein, Ed. Wiley-Vch. 443p.

DINUCCIO, E.; BALSARI, P.; GIOELLI, F.; MENARDO, S. (2010) **Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses**. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 10, p. 3780-3783.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. **Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis**

**derivados do petróleo em veículos automotores.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 18, n. 1, p. 66, 2014.

DONG, L.; ZHENHONG, Y.; YONGMING, S. (2010) **Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW).** Bioresource Technology, v. 101, n. 8, p. 2722-2728.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2017:** Ano base 2016,2017. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em mar. 2018.

ERNST, M.; RODECKER, J.; LUVAGA, E.; ALEXANDER, T.; KLIEBENSTEIN, J.; MIRANOWSKI, J. **Viability of methane production by anaerobic digestion on Iowa swine farms.** Ames, Iowa State University, Department of Economics, 1990. 7 p.

ESPERANCINI, M. S. T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A. E. B.; SIMON, E. J. **Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo.** Revista Engenharia Agrícola, 2007. v. 27, n. 1, p. 110-118.

FARHAD, S.; YOO, Y.; HAMDULLAHPUR, F. (2010) **Effects of fuel processing methods on industrial scale biogas-fuelled solid oxide fuel cell system for operating in wastewater treatment plants.** Journal of Power Sources, v. 195, n. 5, p. 1446-1453.

FARIAS, J. S., TEIXEIRA, R. M. **A Pequena e Microempresa e o Meio Ambiente: a percepção dos empresários com relação aos impactos ambientais.** Revista Organizações & Sociedade, Salvador, v. 9, n. 23, 2002.

FERNÁNDEZ, J.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. **Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW).** Bioresource Technology, v. 99, n. 14, p. 6075-6080, 2008. ISSN 0960-8524.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura.** 2012. 211f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FRITSCH, M.; HARTMEIER, W.; CHANG, J. S. **Enhancing hydrogen production of Clostridium butyricum using a column reactor with square-structured ceramic fittings.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 33 pp. 6549-6557, 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER - FEPAM. **Critérios Técnicos Referentes à Localização e à Disposição de Resíduos de Estabelecimentos Rurais Destinados a Suinocultura e Avicultura.** Porto Alegre, FEPAM, 1995.

GACITUA, M. A. et al (2014) **Boosting the electrocatalytic activity of Desulfovibrio paquesii biocathodes with magnetite nanoparticles.** International Journal of Hydrogen Energy 39:14540–14545

GASPAR, R. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR.** 2003. 119p. Dissertação (Engenharia de Produção) - UFSC.

GIANNETTI, BIAGIO; ALMEIDA, CECÍLIA M. V. B; RODRIGUES, ANTÔNIO JOSÉ MONTEIRO; BONILLA, SILVIA H. **A Contabilidade Ambiental na Metodologia do**

**Ecodesign: Utilizando a Energia como uma Medida Quantitativa de Avaliação de Carga Ambiental. O Caso das Embalagens PET.** 1º International Workshop Advances in Cleaner Production, 2008.

GORGATI, C. Q. **Resíduos Sólidos Urbanos em Área de Proteção aos Mananciais – Município de São Lourenço da Serra – SP: Compostagem e Impacto Ambiental.** 2001.

HARITWAL, A.; CHAUDLHARY, M.; MOHAN, D.; ASOPA, P.P. **Study on the improved biogas generation trough magnetic field modified anaerobic digestion.** International Journal Engineering Research & Technology. v.4, n.5, 2015.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. (2005). **Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Infuence of co-digestion with manure.** Water Research, (39): 1543–1552.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté. São Paulo, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Mapas Interativos.** Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 mai. 2018.

JEAN, A. V. P.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; DEL OLMO, A. O.; ROALCABA, O. D. C. **An economic holistic feasibility assessment of centralized and decentralized biogas plants with mono-digestion and co-digestion systems.** Renewable Energy 2019; 139:40-51.

JIANG, X.; HAYASHI, J.; SUN, Z. Y.; YANG, L.; TANG, Y. Q.; OSHIBE, H.; OSAKA, N.; KIDA, K. **Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition.** Process Biochemistry, 2013; 48:1778-1784.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás.** 1. ed. Lajeado: Editora da Univates - Rio Grande do Sul, 2014.

KATO, S., HASHIMOTO, K., AND WATANABE, K. (2012). **Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via (semi)conductive iron-oxide minerals.** Environ. Microbiol. 14, 1646–1654. doi: 10.1111/j.1462-2920.2011.02611.x

KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em forma líquida.** 56 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Escola Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1980.

KONZEN, E. A. **Manejo e utilização dos dejetos de suínos. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA,** 1983. 32p. (EMBRAPA-CNPSA. Circular técnica 6)

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; RAMME, M. A.; COLDEBELLA, A. **Effect of Storage Time on Swine Manure Solid Separation Efficiency by Screening.** Bioresource Technology, v. 100, 2009, p. 1815-1818.

LA FARGE, B. **Le Biogaz - Procèdes de Fermentation Méthanique.** Paris: Masson, 1979.

LAPPONI, J. C. **Projetos de Investimentos, Construção e Avaliação do Fluxo de Caixa.** São Paulo: Laponi Treinamento e Editora, 2000.



- LEI, Y.; WEI, L.; LIU, T.; XIAO, Y.; DANG, Y.; SUN, D.; and HOLMES, D. E. (2018) **Magnetite enhances anaerobic digestion and methanogenesis of fresh leachate from a municipal solid waste incineration plant.** Chem Eng J 348: 992-999.
- LEITE, S., P.; SILVA, C.R.; HENRIQUES, L., C. **Impactos ambientais ocasionados pela agropecuária no Complexo Aluízio Campos.** Revista Brasileira de Informações Científicas. v.2, n.2, p.59-64. 2011. ISSN 2179-4413
- LENSU, T.; ALAKANGAS, E. (2004). **Small-scale Electricity Generation from Renewable Energy Sources. A glance of Selected Technologies, their Market Potential and Future Prospects-VTT.OPET Report 13.**
- LENZ, R. F. **Bioenergia. Metano a partir da biomassa.** Joaçaba, Lindner/Hidráulica Industrial S/A., s.d. (folders).
- LIMA, M. A.; BOEIRA, R. C.; CASTRO, V. L. S. S.; LIGO, M. A. V.; CABRAL, O. M. R. **Estimativas das emissões de gases de efeito estufa proveniente de atividades agrícolas no Brasil.** In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. (Ed.) Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira. Jaguariúna: EMBRAPA/CNPMA, 2001. cap. 7, p.169-89.
- LINDNER, E. A. (1999). **Diagnóstico da suinocultura e avicultura em Santa Catarina Florianópolis.** Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.
- LIU, J.; PEARCE, C. I.; LIU, C.; WANG, Z.; SHI, L.; ARENHOLZ, E.; and ROSSO, K. M. **Fe<sub>3</sub>- xTi<sub>x</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as tunable probes of microbial metal oxidation.** J Am Chem Soc 2013.135: 8896-8907.
- LIU, L.; ZHANG, T.; WAN, H.; CHEN, Y.; WANG, X.; YANG, G.; REN, G. **Anaerobic co-digestion of animal manure and wheat straw for optimized biogas production by the addition of magnetite and zeolite.** Energy Conversion and Management 2015; 97:132-139.
- LORA, E.; PIÑAS, J.; VENTURI, O.; OLIVEIRA, M.; ROALCABA, O. **Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e BIOGAS model.** Revista Brasileira de Estudos de População, v.33, n.1, p.175-188, 2016.
- LUCAS JÚNIOR, J. **Aproveitamento Energético de Resíduos da Suinocultura.** In: Energia, Automação e Instrumentação. Lavras: UFLA/SBEA, 1999. p. 81.
- MAO, C.; et al. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 45, p. 540-555, 2014.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) **Suinocultura de baixa emissão de carbono: tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de suínos. Secretaria de Mobilidade Social, do Produtor Rural e do Cooperativismo.** - Brasília: MAPA, 2016. 100 p. ISBN 978-85-7991-100-2.
- MARTINHO, H. M. **Avaliação da Efetividade de Arranjos Tecnológicos e Processuais na Melhoria Ambiental da Produção de Fosfato Bicálcico.** São Paulo, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

- MATA- ALVAREZ, J.; et al. **A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 412-427, 2014.
- MATOS J. **Influência do eletromagnetismo na biodigestão anaeróbia**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências (Geociências e Meio-Ambiente)) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
- MATOS, G. M. **Mapeamento do campo magnético dentro do estator de um motor de corrente contínua com ímã permanente utilizando o método dos elementos finitos**. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso – Campus Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018
- MELO, H. A. I., **Análise de ciclo de vida (ACV) de sistemas integrados de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos para cidades de médio porte**. 142p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá, 2016
- METODOLOGIA PARA ESTIMAR O POTENCIAL DE BIOGÁS E BIOMETANO A PARTIR DE PLANTÉIS SUÍNOS E BOVINOS NO BRASIL / Jessica Yuki de Lima Mito ... [et al.]. - Concórdia : Embrapa Suínos e Aves, 2018
- MORAIS, M. **Estudo experimental e avaliação econômica da operação de biodigestores tubulares para a produção de biogás a partir de resíduos da suinocultura**. 2012. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- MUDHOO, A., KUMAR, S., 2013. **Effects of heavy metals as stress factors on anaerobic digestion processes and biogas production from biomass**. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10 (6), 1383–1398.
- MURTO, M.; BJORNSSON, L.; MATTIASSON, B. **Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure**. *Journal of Environmental Management*, 70 p.101-107, 2004.
- NIELSEN, L. P.; RISGAARD-PETERSEN, N.; FOSSING, H.; CHRISTENSEN, P. B.; and SAYAMA, M. (2010). **Electric currents couple spatially separated biogeochemical processes in marine sediment**. *Nature* 463: 1071-1074.
- NIGRI, E. M. **Análise Comparativa do Ciclo de Vida de Produtos Alimentícios Industriais e Artesanais da Culinária Mineira**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2012.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1ª ed., 1986. 93 p.
- NGES, I. A.; LIU, J. **Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions**. *Renewable Energy*, v. 35 p. 2200-2206, 2010.
- OELGESCHLÄGER, E.; ROTHER, M. **Carbon monoxide-dependent energy metabolism in anaerobic bacteria and archaea**. *Arch Microbiol* 2008; 190:257–69. doi:10.1007/s00203-008-0382-6.
- OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA/ CNPSA, 1993. 188 p. (Documento, 27)

OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2004.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Geração e Utilização de Biogás em Unidade de Produção de Suínos**. Concórdia-SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006. 42 p.

OLIVEIRA, R. D. E. **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 (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2009.

ORTIZ, N. **Estudo da utilização de magnetita como material adsorvente nos metais  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  e  $Cd^{2+}$  em solução**. Tese Doutorado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 158p. São Paulo, 2000.

PAGLIUSO J.D., REGATTIERI C.R. **Study of the use of biogas energy from slurry incineration for the generation of electricity**. Brazilian Journal of Environmental Sciences 2008; 1:32-38.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo como o passado para entender o presente e garantir o futuro**. Disponível [www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=artigos&cod\\_artigo=272](http://www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=artigos&cod_artigo=272). Acesso em: 20 out. 2017.

PAVLOSTATHIS, S. G.; GIRALDOGOMEZ, E. **Kinetics of anaerobic treatment** Water Science and Technology, v. 24, n° 8, p. 35-59, 1991.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Energia) - Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PENG, H.; ZHANG, Y.; TAN, D.; ZHAO, Z.; ZHAO, H.; and QUAN, X. (2018) **Roles of magnetite and granular activated carbon in improvement of anaerobic sludge digestion**. Bioresour Technol 249: 666-672.

PERDOMO, C. C; COSTA, R. R; MEDRI, V; MIRANDA, C. R. **Dimensionamento de sistema de tratamento e utilização de dejetos suínos**. Concórdia: EMBRAPA. Suínos e Aves, 1999. 5p. (EMBRAPA - Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 234).

PÉREZ-GONZÁLEZ, T., JIMENEZ-LOPEZ, C., NEAL A. L., RULL-PEREZ, F., RODRIGUEZ-NAVARRO A., FERNANDEZ-VIVAS, A., IÁÑEZ-PAREJA, E. 2010, **Magnetite biomineralization induced by shewanella oneidensis**. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74 (3), 967-979.

POSCHL, M.; WARD S.; OWENDE, P. **Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways**. Applied Energy, v. 87, Issue 11, Nov. p. 3305-3321, 2010.

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO – PNUD, Ministerio de Energia. **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura**. FAO, Global Environment Facility – GEF, *Manuel de Biogás*. Santiago de Chile: FAO, 2011. 120 p.

PROJETO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. **Relatório Técnico Parcial I: Revisão Bibliográfica: Geração de Biomassa - Unidade Granja Colombari (UGC)**. Foz do Iguaçu: FINEP - ITAI, 2009a.

PURWANTO, H. AKIYAMA, T., **Hydrogen production from biogas using hot slag**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 31, 491-495, (2006)

\_\_\_\_\_. **Relatório Técnico Parcial I: Geração Distribuída de Energia Elétrica a Biogás Com Saneamento Ambiental**. Foz do Iguaçu: FINEP - ITAI, 2011.

RODRIGUES, C. R. B.; ZOLDAN, M. A.; LEITE, M. L. G.; OLIVEIRA, I. **Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV)**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28, . Rio de Janeiro, 2008.

ROSIÈRE, C.A.; RENGER, F.E.; PIUZANA, D.; SPIER, C.A. 2005. **Pico de Itabira, Minas Gerais – Marco estrutural, histórico e geográfico do Quadrilátero Ferrífero**. In.: Winge, M. Schobbenhaus,C.; Berbert-Born, M; Queiroz,E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S., (Edit.). Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) - Brasília.

RAFUL, N. F.; JUCHEM, D. M.; CAVALHEIRO, M. E. **Gestão ambiental como diferencial competitivo empresarial**. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, v. 6, n. 2, 2010.

SAHM, H. **Biologie der Methan-Bildung** (Biology of Methane Formation). Chemie Ingenieur Technik, v.53, n.11, p. 854-863, 1981.

SALOMON, R.; VAN ELK, M.; ASPELL, J. E.; and BLANKE, O. **I feel who I see: Visual body identity affects visual–tactile integration in peripersonal space**. Conscious Cogn 21(3):1355–1364, 2012.

SANTOS G. R. **Agroindustry in Brazil: a look at indicators of size and regional expansion**. Radar Technol. Prod. Foreign Trade 2014; p. 7-19.

SCHERER, E. E.; CASTILHOS, E. G. de; JUCKSCH, I.; NADAL, R. de. **Efeito da adubação com esterco de suínos, nitrogênio e fósforo em milho**. Florianópolis, EMPASC, 1983. 26p. (Boletim técnico, 24).

SCHERER, E.E.; AITA, C.; BALDISSERA, I.T. **Avaliação da qualidade do esterco líquido de suínos da região Oeste Catarinense para fins de utilização como fertilizante**. Florianópolis: EPAGRI, 1996, 46p. (EPAGRI. Boletim Técnico, 79).

SCHIEVANO, A., TENCA, A., SCAGLIA, B., MERLINO, G., RIZZI, A., DAFFONCHIO, D., OBERTI, R., ADANI, F., 2012. **Two-stage vs. singlestage anaerobic digestion: comparison of energy production and biodegradation efficiencies**. Environmental Science and Technology 46, 8502e8510.

SCOTT. T. B.; ALLEN G. C.; HEARD P. J.; RANDELL M. G. **Reduction of U(VI) on the surface of magnetite**. Geochim. Cosmochim. Acta v.69, n. 24, p. 5639-5646, 2005.

SGANZERLA, E. **Biodigestores: uma solução**. Porto Alegre. Agropecuária, 1983.

SILVA, V. K.; SILVA, J. D. T.; GRAVENA, R. A.; MARQUES, R. H.; HADA, F. H.; MORAES, V. M. B. **Desempenho de frangos de corte de 1 a 21 dias de idade alimentados**

**com rações contendo extrato de leveduras e prebiótico e criados em diferentes temperaturas.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v.38, n.4, p.690-696, 2009.

SKOMURSKI, F. N.; KERISIT, S.; and ROSSO, K. M. (2010) **Structure, charge distribution, and electron hopping dynamics in magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (1 0 0) surfaces from first principles.** *Geochim Cosmochim Acta* 74: 4234-4248.

SPEECE R.E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewater.** Nashville: Archae; 1996.

SILVA, C. L.; BASSI, N. S. **Análise dos impactos ambientais no Oeste Catarinense e das tecnologias desenvolvidas pela Embrapa Suínos e Aves.** In: VI Encontro Nacional da ANPPAS. Belém – PA. set. 2012. p. 10-27

SILVA, TR, BARROS, RM, TIAGO FILHO, GL, e DOS SANTOS, IFS (2017). **Metodologia para a determinação da potência ótima de uma Usina Termelétrica (TPP) por biogás de aterro sanitário.** *Waste Management*, 65, 75-91. doi: 10.1016 / j.wasman.2017.04.018

SINOTTI, A. P. S. **Avaliação do volume de dejetos e da carga de poluentes produzidos por suíno nas diferentes fases do ciclo criatório.** 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SOUZA, C. F.; LUCAS JUNIOR, J.; & FERREIRA, W. P. M. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato – considerações sobre a partida.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2002, Salvador. Anais. Salvador: Sbea, 2002. p.102-108.

SOUZA, Cecília de Fátima; CARVALHO, Cinara da Cunha Siqueira; CAMPOS, Josiane Aparecida; MATOS, Antônio Teixeira; FERREIRA, Williams Pinto Marques. **Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação.** *Revista Ceres*. Viçosa: v. 56, n. 2, mar./abr. 2009. p. 128-133.

SOUZA, J. C.; MARAL, A.; MORÉS, N.; TREMÉA, S.; and MIELE, M. **Production system: pig production system based on planning, management and operational standards.** Concórdia: Embrapa Swine and Poultry, 2013.

SOUZA, S. **Manual de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás no Meio Rural.** Cascável, PR. Universidade Federal do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2016. 47 p.

STRANDDORF, H.K., HOFFMANN, L., SCHMIDT, A. **Impact categories, normalization and weighting in LCA.** Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency Environmental News, 98. 2005

TAKASHIMA, M.; SPEECE, R.E. **Mineral Requirements for Methane Fermentation.** *Critical Review in Environmental Control*, v. 19, n.5, p. 465-479.

TEGHAMMAR, A.; YNGVESSON, J.; LUNDIN, M.; TAHERZADEH, M.J.; HORVÁTH, I.S. **Pretreatment of paper tube residuals for improved biogas production.** *Bioresource Technology*, 2010, v. 101, n. 4, p. 1206-1212.

TUFANER, F., & AVŞAR, Y. (2016). **Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review.** *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9), 2303–2312. doi:10.1007/s13762-016-1069-1

VALOR ECONÔMICO; Mercado dólar comercial. Disponível em: [www.valor.com.br](http://www.valor.com.br). Acesso em: novembro de 2019.

VAN WYLEN, R. G. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, Tradução da 5ª edição americana, 1998.

von SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento biológico de águas residuárias: introdução a qualidade das águas e ao tratamento dos esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014, 472 p

WANG, D. X.; HAN, Y. X.; HAN, H. J.; LI, K.; XU, C.Y.; and ZHUANG, H. F. (2018a) **New insights into enhanced anaerobic degradation of Fischer-Tropsch wastewater with the assistance of magnetite**. *Bioresour Technol* 257: 147-156.

WANG, T.; ZHANG, D.; DAI, L.; DONG, B.; and DAI, X. (2018b) **Magnetite triggering enhanced direct interspecies electron transfer: a scavenger for the blockage of electron transfer in anaerobic digestion of high-solids sewage sludge**. *Environ Sci Technol* 52: 7160-7169.

WANG, Y., REN, G., ZHANG, T., ZOU, S., MAO, C., & WANG, X. (2017). Effect of magnetite powder on anaerobic co-digestion of pig manure and wheat straw. *Waste Management*, 66, 46–52. doi:10.1016/j.wasman.2017.04.031

WANG, G.; et al. **Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw**. *Bioresour. Technolgy* 120 p. 78-83, 2012

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives**. *Appl. Microbiology Biotechnology.*, v. 85, p. 849-860, 2010.

WEILAND, P. **Anforderungen an Pflanzen seitens des Biogasanlagenbetreibers**. In: Thüringer Bioenergietag, 12., 2006. Jena, Eigenverlag. Anais... Jena, 2006, p.26-32.

Wresta A, Saepudin A. **Estimation of Oxygen Concentration in the Slurry in Biogas Production Without O<sub>2</sub> Removal in Initial Process**. *Energy Procedia* 2013; 32:115–21. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2013.05.015.

WU, C.; ZHANG, H.; HE, P.; SHA, L. **Thermal stabilization of chromium slag by sewage sludge: effects of sludge quantity and temperature**. *Journal of Environmental Sciences*. 22 (7), 1110–1115. 2010.

YANG, Y., ZHANG, Y., LI, Y., ZHAO, H., and PENG, H. (2018). **Nitrogen removal during anaerobic digestion of wasted activated sludge under supplementing Fe (III) compounds**. *Chemical Engineering Journal*, 332, 711–716. doi:10.1016/j.cej.2017.09.133

YASIN, N. H. M. et al. **Microbial characterization of hydrogen-producing bacteria in fermented food waste at different pH values**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, nº 16, p. 9571-9580, 2011.

YIN, Q.; YANG, S.; WANG, Z.; XING, L.; and WU, G. (2018) **Clarifying electron transfer and metagenomic analysis of microbial community in the methane production process with the addition of ferrous oxide**. *Chem Eng J* 333: 216-225.

YU, L.; YAOQIU, K.; NINGSHENG, H.; ZHIFENG, W.; LIANZHONG, X. **Popularizing household-scale biogas digesters for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation.** *Renewable Energy*, 33, 2027–2035. 2008.

ZHAO, Z.; LI, Y.; YU, Q.; and ZHANG, Y. (2018) **Ferroferric oxide triggered possible direct interspecies electron transfer between Syntrophomonas and Methanosaeta to enhance waste activated sludge anaerobic digestion.** *Bioresour Technol* 250: 79-85.

ZHANG, P.; CHEN, Y.; ZHOU Q. **Waste activated sludge hydrolysis and short-chain fatty acids accumulation under mesophilic and thermophilic conditions: effect of Ph.** *Water Research* v. 43, p. 3735-3742, 2009.

ZHANG, G.; ZHAO, Q.; JIAO, Y.; WANG, K.; LEE, D. J.; REN, N. **Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell.** *Water Research*, 46, 43–52. 2012.

ZHANG, L. et al. **Influence of Temperature and pH on Methanogenic Digestion in Two-phase Anaerobic Co-digestion of Pig Manure with Maize Straw.** *Journal of Residuals Science & Technology*, 2016.

ZIELIŃSKI, M.; DEBOWSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; DUDEK, M.; GRALA, A. **Effect of constant magnetic field (CMF) with various values of magnetic induction effectiveness of dairy wastewater treatment under anaerobic conditions.** *Polish Journal of Environmental Studies*. v.26, n.1, p. 255-261, 2013.

ZIGANSHIN, AM, LIEBETRAU, J., PRÖTER, J. E KLEINSTEUBER, S. (2013). **Estrutura e dinâmica da comunidade microbiana durante a digestão anaeróbica de vários resíduos agrícolas.** *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97, 5161-5174. doi: 10.1007 / s00253-013-4867-0

**ANEXO A - Caracterização química de entrada e saída para os processos de Batelada I e II dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019)**

Parâmetros	Dejetos de Suíno sem mistura					
	Batelada I			Batelada II		
	Entrada	Saída	Variação (%)	Entrada	Saída	Variação (%)
pH	6,5	6,7	3%	6,15	6,6	7%
DQO (mgL <sup>-1</sup> )	24.853,0	7.840,0	-68%	21.310,0	2.185,0	-90%
DBO (mgL <sup>-1</sup> )	10.706,0	3.225,0	-70%	17.588,4	1.515,4	-91%
Nitrogênio Total (mgL <sup>-1</sup> )	217,0	1089,0	80%	233,8	952,0	75%
Sólidos Totais (mgL <sup>-1</sup> )	49.420,0	4.200,0	-91%	23.450,0	11.080,0	-53%
Sólidos Totais Fixos (mgL <sup>-1</sup> )	8.190,0	1.360,0	-83%	6.100,0	1.390,0	-77%
Sólidos Voláteis (mgL <sup>-1</sup> )	41.230,0	2.840,0	-93%	17.350,0	9.690,0	-44%
COT (mgL <sup>-1</sup> )	24.853,0	7.840,0	-68%	21.310,0	2.1850	-90%
Relação DQO:DBO	2,32	2,43	5%	1,20	1,44	17%



**ANEXO B - Geração de gases das unidades experimentais no processo de Batelada I dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019)**

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH4 (%)	Média CH4 (%)	CO <sub>2</sub> (%)	Média CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Média O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Média H <sub>2</sub> S (ppm)	BAL (%)
Dejetos de suíno	27/03/2018	UE1	0,0	0,8	0,2	8,5	20,8	14,1	3,0	8,5	8,0	6,0	76,7
		UE2	1,6		16,8		7,3		14		4,0		
	19/04/2018	UE1	15,6	25,9	15,6	19,6	15,7	9,3	1,0	2,0	47	25,5	45,3
		UE2	36,2		23,5		2,8		3,0		4,0		
	25/04/2018	UE1	7,9	9,5	13,5	12,0	10,8	12,7	5,0	3,0	6,0	18,5	65,9
		UE2	11		10,5		14,5		1,0		31		
	04/05/2018	UE1	11,2	20,2	10,7	16,6	15,9	9,2	0,0	0,0	16	8,5	54,2
		UE2	29,1		22,4		2,4		0,0		1,0		
	15/05/2018	UE1	24	33,4	22,5	39,2	1,4	0,9	145	87,0	8	163,5	26,6
		UE2	42,8		55,9		0,3		29		319		
	21/05/2018	UE1	9,6	15,0	9,3	15,8	16,5	8,8	7,0	7,5	4,0	2,5	60,5
		UE2	20,4		22,2		1,1		8,0		1,0		

**ANEXO C: Geração de gases das unidades experimentais no processo de Batelada II dos dejetos de suínos sem mistura, segundo a pesquisa de Castro e Silva et al (2019)**

Amostras	Data de Leitura	Unidade Experimental	CH4 (%)	Média CH4 (%)	CO2 (%)	Média CO2 (%)	O2 (%)	Média O2 (%)	CO (ppm)	Média CO (ppm)	H2S (ppm)	Média H2S (ppm)	BAL (%)
Dejetos de suíno	10/07/2018	UE1	3,7	9,8	7,3	20,5	18,1	15,6	21	14,5	10	16,5	54,2
		UE2	15,8		33,7		13		8,0		23		
	18/07/2018	UE1	10,8	20,4	10,3	25,2	15,7	14,3	9,0	21,0	5,0	23,0	40,2
		UE2	29,9		40,1		12,8		33		41		
	25/07/2018	UE1	26,7	31,9	64	52,4	9,0	13,0	10	31,0	84	42,0	2,8
		UE2	37		40,8		17		52		0,0		
	02/08/2018	UE1	38,8	38,0	48,8	48,5	10,7	10,3	13	11,5	0,0	0,0	3,3
		UE2	37,2		48,2		9,8		10		0,0		
	16/08/2018	UE1	38,8	39,2	57,4	48,4	1,3	5,9	367	262,0	53	28,5	6,6
		UE2	39,5		39,4		10,4		157		4,0		
	21/08/2018	UE1	35,2	45,3	58	45,4	4,1	4,5	50	53,0	3,0	2,0	4,9
		UE2	55,3		32,8		4,8		56		1,0		
	24/08/2018	UE1	30,8	42,7	52,2	45,3	10,3	7,2	91	85,0	3,0	3,0	4,8
		UE2	54,6		38,4		4,1		79		3,0		

**ANEXO D: Análises de metais pesados dos dejetos de suínos sem mistura antes e depois da biodigestão, segundo Castro e Silva et al (2019)**

		Batelada I		Batelada II	
Metais	Antes	Depois	Redução (%)	Depois	Redução (%)
Ferro (mg/L)	8.21	3.89	52.62	45.450	-453.52
Zinco (mg/L)	0.62	1.97	-217.64	20.89	-3269.03
Manganês (mg/L)	15.31	2.49	83.73	0.84	94.52
Cobre (mg/L)	0	0.96	-	0.92	-

**ANEXO E: Capacidade de produção de metano máxima para suínos (B<sub>0</sub>).**

Segundo o documento de Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil, publicado por Embrapa Suínos e Aves no ano 2018, mostra uma pesquisa bibliográfica da capacidade de produção de metano, denominado como (B<sub>0</sub>), os autores evidenciam a máxima produção de metano possível a partir de suínos.

<b>Categoria</b>	<b>B<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> kgSV<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fonte</b>
<b>Suínos</b>	0,29	IPCC (2006)
	0,34	EU-Agro Biogas (2015)
	0,37	CIBiogás-ER (2015)