

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**VANESSA ALUETH CAILLOT**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DOS  
RESÍDUOS DA SUINOCULTURA CODIGERIDOS COM RESÍDUOS  
AGRÍCULTURA BRASILEIRA**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**VANESSA ALUETH CAILLOT**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DOS  
RESÍDUOS DA SUINOCULTURA CODIGERIDOS COM RESÍDUOS  
AGRÍCULTURA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

**PONTA GROSSA**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa  
n.35/17

C134 Caillot, Vanessa Alueth

Avaliação do potencial de produção de biogás dos resíduos da suinocultura  
codigeridos com resíduos agricultura brasileira. / Vanessa Alueth Caillot. 2017.  
84 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná. Ponta Grossa, 2017.

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Suínos - Criadores. 4. Resíduos agrícolas. I.  
Francisco, Antonio Carlos de. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III.  
Título.

CDD 670.42



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Ponta Grossa**  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Título de Dissertação N° **302/2017**

### **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DOS RESÍDUOS DA SUINOCULTURA CODIGERIDOS COM RESÍDUOS DA AGRICULTURA BRASILEIRA**

por

**Vanessa Alueth Caillot**

Esta dissertação foi apresentada às **17h30min** de **27 de abril de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. José Barroso de Souza (IFES)**

**Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski**  
**(UTFPR)**

**Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser (UTFPR)**

**Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco**  
**(UTFPR) - Orientador**

**Visto do Coordenador:**

**Antonio Carlos de Francisco (UTFPR)**  
**Coordenador do PPGEP**

- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NA COORDENAÇÃO DO CURSO -

Dedico este trabalho à minha Filha Thalita  
Vitória de Lima, pelo seu amor e  
compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que sendo dono de todo o conhecimento e toda a sabedoria ainda assim me permite chama-lo de pai, me conforta, me guarda, me inspira a ter grandes sonhos e me enche de forças para conquista-los.

À minha filha Thalita Vitória, por todo apoio, amor, compreensão e beijos de boa noite que sempre me acalentaram depois de um dia de trabalho exaustivo.

À minha mãe, por toda orientação, amor e educação.

À minha família e amigos, pelo apoio e por compartilhar grandes momentos.

Ao meu orientador, pelas oportunidades, amizade e orientações.

Aos professores Cassiano Moro Piekarski e Daniel Poletto Tesser pela disponibilidade e orientações, obrigada!

Aos queridos colegas do laboratório LESP.

Aos professores participantes das bancas de qualificação e defesa desta dissertação, pela disponibilidade e críticas construtivas;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos recursos, estrutura e excelência de ensino no mestrado em Engenharia de Produção.

À CAPES/CNPQ pelo auxílio financeiro.

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

Esta vontade de super exploração da terra nos fez sentir, nos últimos anos, os limites da terra, de seus recursos não renováveis e percepção do mundo finito. Conclusão: Um planeta finito não suporta um projeto infinito.  
(Leonardo Boff, 2012)

## RESUMO

CAILLOT, Vanessa Alueth. **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.

A suinocultura resulta em uma série de resíduos que se não tratados de forma adequada poluem o meio ambiente. A Produção de biogás a partir destes resíduos através da digestão anaeróbica (DA) transforma um passivo ambiental em matéria prima para a produção de energia. No entanto a DA esta longe de ser um processo simples, fatores como composição do resíduo, toxicidade, operação da produção podem limitar a produção de biogás. A codigestão anaeróbica, a digestão simultânea de dois ou mais substratos, é uma opção viável para superar as desvantagens da monodigestão, melhorando a produção de biogás. O Brasil possui grande potencial agrícola, atividade que também gera uma quantidade significativa de resíduos, desta forma o objetivo desta pesquisa consistiu em avaliar o potencial de ampliação da produção de biogás dos resíduos da suinocultura codigeridos com os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil. Os resultados foram alcançados através de um portfólio Bibliográfico levantado sobre do processo de produção de biogás, seguidos da identificação dos principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil, a partir destes resultados iniciou-se pesquisa por palavras chaves nas principais bases de dados internacionais a fim verificar quais resíduos agrícolas produzidos no Brasil podem ser codigeridos com resíduos da suinocultura. Por fim analisou-se a proporção de resíduos utilizada, a quantidade de biogás produzida e as condições de operação do processo. Os resultados indicam que os resíduos de arroz e de milho podem ser codigeridos com os resíduos da suinocultura, as condições operacionais em que houve maior produção de biogás a partir da DA destes resíduos foram identificadas. Desta forma, a produção de biogás pode ser ampliada através da codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura com os resíduos agrícolas de arroz e de milho.

**Palavras-chave:** Biogás. Digestão anaeróbica. Codigestão anaeróbica. Resíduos da suinocultura. Resíduos agrícolas.

## ABSTRACT

CAILLOT, Vanessa Alueth. **Evaluation of the potential of the biogas production of swine residues codigerated with Brazilian agricultural waste**. 2017. 84 p. Dissertation (Master in Production Engineering) Federal University Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Swine breeding results in a series of wastes that if not properly treated pollute the environment. The biogas production from these residues through anaerobic digestion (AD) transforms an environmental liability into raw material for the production of energy. However the AD is far from a simple process, factors such as composition of the waste, toxicity, production operation can limit the production of biogas. Anaerobic co-digestion, the simultaneous digestion of two or more substrates, is a viable option to overcome the disadvantages of digestion, improving biogas production. Brazil has great agricultural potential, an activity that also generates a significant amount of waste. In this way, the objective of this research was to evaluate the potential for the expansion of biogas production of the swine residues co-digestion with the main agricultural residues produced in Brazil. The results were achieved through a Bibliographic portfolio collected on the biogas production process, followed by the identification of the main agricultural residues produced in Brazil, from these results a search was started for key words in the main international databases in order to verify which agricultural residues produced in Brazil may be co-digestion with swine residues. Finally, the proportion of waste used, the amount of biogas produced and the process operating conditions were analyzed. The results indicate that rice and maize residues can be co-digestion with swine residues; the operational conditions in which there was more biogas production from AD of these residues were identified. In this way, the biogas production can be increased through the anaerobic co-digestion of swine residues with agricultural residues of rice and maize.

**Keywords:** Biogas. Anaerobic digestion. Anaerobic codigestion. Swine waste. Agricultural waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos passos delineados para a condução da dissertação .....	24
Figura 2 - Esquema do processo de produção de biogas .....	26
Figura 3 - Processo de digestão anaeróbica .....	32
Figura 4 - Abate suíno por estado .....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais autores, temas e aspectos observados .....	22
Quadro 2 - Países que realizaram pesquisas de codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura e Agrícolas desde 2010.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção média diária de esterco (kg), esterco + urina (kg) e dejetos líquidos (L) por animal por fase de criação .....	49
Tabela 2 - Volume diário de dejetos líquidos (Litros/animal/dia) produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina. ....	49
Tabela 3 - Volume diário de dejetos líquidos (Litros/animal/dia) produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina. ....	50
Tabela 4 - Volume em L de metano /Kg SV .....	51
Tabela 5 - Oferta mássica de biomassa por resíduo agrícola no Brasil (10 <sup>6</sup> t/ano).....	58
Tabela 6 - Pesquisa bibliométrica resíduos suínos e resíduos agrícolas .....	23
Tabela 7 - Produção de biogás e parâmetros operacionais da codigestão de resíduos suínos e resíduos de milho .....	64
Tabela 8 - Produção de biogás e parâmetros operacionais da codigestão de estrume suíno e resíduos de arroz .....	65

## LISTA DE SIGLAS

ABCS	Associação Brasileira de criadores suínos
ABPA	Associação Brasileira de proteína animal
AGV	Ácidos gordos voláteis
AGVL	Ácidos gordos voláteis de cadeia longa
C/N	Carbono/ nitrogênio
CC	Ciclo completo
COV	Carga orgânica volumétrica
CR	Crechários
DA	Digestão anaeróbica
DQO	Demanda química de oxigênio
GEE	Gases de efeito estufa
GL	Giga Litros
IBGE	Instituto Brasileiro de geografia e estatística
IICA	Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura
PNE	Plano Nacional de energia
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TRH	Tempo de retenção hidráulica
UPD	Unidade de produção de desmamados
UPL	Unidade produtora de leitões
UT	Unidade de terminação

## LISTA DE ACRÔNIMOS

MAPA	Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento
IPEA	Instituto de pesquisa econômica aplicada
ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH <sub>4</sub>	Metano
Co	Cobre
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
Fe	Ferro
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
HCL	Acido clorídrico
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
N	Nitrogênio
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
NaOH	Hidróxido de sódio
NI	Níquel

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS .....	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....</b>	<b>25</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS .....	25
2.2 ENGENHARIA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	26
2.2.1 Etapa pré DA (1ª etapa).....	27
2.2.1.1 A seleção da matéria prima .....	27
2.2.1.2 O armazenamento da matéria prima.....	27
2.2.1.3 Processamento e pré-tratamento .....	28
2.2.1.4 O carregamento da matéria-prima .....	28
2.2.2 A Produção de Biogás (2ª etapa).....	29
2.2.3 O Armazenamento do Biofertilizante (3ª etapa).....	30
2.2.4 Tratamento e Armazenamento do Biogás (4ª etapa).....	30
2.3 A DIGESTÃO ANAEROBICA.....	31
2.3.1 Hidrólise .....	32
2.3.2 Acidogênese .....	33
2.3.3 Acetogênese .....	34
2.3.4 Metanogênese .....	35
2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS .....	35
2.4.1 Temperatura .....	35
2.4.2 pH .....	36
2.4.3 Carga Orgânica Volumétrica (COV).....	37
2.4.4 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH).....	39
2.5 A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	39
2.5.1 Relação Carbono/ Nitrôgenio.....	41

2.5.2 Ácidos Gordos Voláteis.....	41
2.5.3 Concentração.....	42
2.5.4 Tamanho da Partícula.....	43
2.6 CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS .....	43
<b>3 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DA SUINOCULTURA .....</b>	<b>46</b>
3.1 A SUINOCULTURA NO BRASIL .....	46
3.2 OS RESÍDUOS DA SUÍNOCULTURA.....	48
3.3 A PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM RESÍDUOS DA SUINOCULTURA .....	51
3.3.1 A Codigestão Anaeróbica dos Resíduos da Suinocultura.....	52
<b>4 OS RESÍDUOS AGRÍCOLAS .....</b>	<b>54</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS.....	54
4.2 OS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL .....	56
4.3 OS PRINCIPAIS RESÍDUOS AGRÍCOLAS PRODUZIDOS NO BRASIL .....	57
4.3.1 Resíduos de Soja.....	58
4.3.2 Resíduos de Milho .....	59
4.3.3 Resíduos de Arroz .....	60
4.3.4 Resíduos de Cana-de-Açúcar.....	60
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1 A CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESIDUOS SUINOS E RESIDUOS DE MILHO .....	63
5.2 A CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS SUÍNOS E RESÍDUOS DE ARROZ.....	65
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>70</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	72
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de biogás a partir de resíduos através da Digestão anaeróbica (DA) como se denomina a conversão de matéria orgânica na ausência de oxigênio tem se mostrado um processo promissor em todo o mundo, promovendo a redução do volume de resíduos antes do descarte final, transformando um passivo ambiental em um valioso recurso para a geração bioenergia.

Ao se referir ao impacto ambiental causado pelas atividades humanas, responsáveis por gerar resíduos acelerando a liberação de gases de efeito estufa para o meio ambiente, juntamente com as emissões causadas pelos combustíveis fósseis responsáveis pela emissão de gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), a DA tem se mostrado uma alternativa relevante.

Contudo, o uso de resíduos para produção de biogás através de DA se mostra cada vez mais interessante, tendo em vista a minimização das quantidades de resíduos lançadas no meio ambiente ao mesmo tempo em que produz biogás.

A produção de biogás através de dejetos de animais tem sido amplamente citada na literatura, Mata-Alvarez et al. (2014) constatou que nos trabalhos publicados entre 2010 e 2013, 54% das pesquisas tratam do esterco animal como substrato principal.

O número expressivo da utilização de dejetos como substrato para a produção de biogás é resultado dos sistemas de criação em confinamento a suinocultura e a necessidade mitigação do impacto ambiental. Com isso o aproveitamento deste recurso depende apenas de pequenas intervenções nas edificações de produção e instalação de conjuntos biodigestores (MAPA, 2016).

No entanto, embora seja adequada e viável, o uso dos resíduos da suinocultura sozinhos não representam a maneira mais eficiente de produzir biogás devido à baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) do substrato (YU et al. 2010). As condições ambientais no digestor como a temperatura, pH, capacidade tampão, concentrações de ácidos graxos também fazem com que os processos comerciais de produção de biogás através da monodigestão sejam com frequência operados bem abaixo de um desempenho ótimo (WARD et al. 2008).

Com isso a digestão simultânea de dois ou mais substratos, denominada codigestão anaeróbica tem sido aplicada como uma alternativa para reduzir os

inconvenientes da monodigestão, alavancando a produção de biogás e melhorando a viabilidade econômica das plantas (MATA-ALVAREZ et al. 2014).

Ainda segundo Mata-Alvarez et al. (2014) a codigestão anaeróbica foi o tópico mais relevante nas pesquisas sobre DA, representando 50% dos trabalhos globais foram publicados entre 2012 e 2013. Seus resultados evidenciam que a DA de um único substrato (mono-digestão) tem se mostrado inoportuna devido às propriedades do substrato, como é o caso do estrume animal que apresenta baixas cargas orgânicas e alta concentração de Nitrogênio (N), resultando baixa produção de biogás.

O fato é que a DA é um processo meticuloso e necessita de atenção especial para que seja realizada de forma eficaz, os esforços devem se concentrar em diminuir os efeitos adjacentes da DA aprimorando da utilização dos resíduos como matéria-prima para a produção de biogás. Mata-Alvarez et al. (2014) discorre que a melhoria da produção de metano se dá principalmente em virtude do aumento de resíduos alocados no biodigestor, o uso de todos os tipos de misturas são consideradas, no entanto é primordial a escolha do melhor cosubstrato, com o objetivo de criar sinergias que favoreçam a diluição compostos nocivos a fim de otimizar a produção de biogás.

No Brasil, apesar da implantação de sistemas de DA ser incipiente quando comparada com países europeus a produção de biogás vem ganhando destaque com a introdução de novas tecnologias para a produção de alimentos e confinamento de animais em escalas crescentes de produção. Desde então os processos de biodigestão vem ganhando espaço principalmente na suinocultura, atividade geradora de grande volume de dejetos e elevadas cargas orgânicas (IPEA, 2012).

Assim como a produção animal, a agricultura também gera grandes quantidades de resíduos, tradicionalmente estes resíduos são deixados no solo para a reestruturação do mesmo, emitindo de gases e impactando o meio ambiente. Estes resíduos são fontes de importantes compostos com interesse comercial que poderiam ser recuperados tanto para diminuir o volume de resíduos gerados quanto para melhorar a viabilidade econômica dos processos, produzindo produtos de valor agregado (VARDEGA, PRADO E MEIRELES, 2015).

Para Forster-Carneiro et al. (2014) o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de *commodities* agrícolas e animais, produzindo uma imensa quantidade

de resíduos que podem ser efetivamente transformados em energia através de um processo conjunto envolvendo a conversão de biomassa em combustível, energia e produtos químicos, integrados no contexto de uma biorrefinaria, onde podem ser produzidos vários biocombustíveis, entre eles o biogás.

Diante do exposto, levanta-se um questionamento sobre a possibilidade de alavancar a produção de biogás partir dos resíduos da suinocultura através da codigestão destes resíduos com resíduos provenientes das atividades agrícolas, a fim de melhorar o desempenho da DA. Neste cenário, definiu-se como problema deste trabalho a seguinte pergunta:

Quais resíduos agrícolas podem ser codigeridos com os resíduos da suinocultura para ampliar a produção de biogás?

## 1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de ampliação da produção de biogás dos resíduos da suinocultura por meio da codigestão com os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever o processo de produção do biogás;
- Identificar os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil;
- Verificar quais dos principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil podem ser codigeridos com resíduos da suinocultura;
- Analisar a proporção de resíduos que geram a maior produtividade de metano;
- Identificar as condições operacionais de produção que geraram a maior produtividade de metano.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A primeira justificativa cabível para esse estudo deve-se ao crescimento tanto da suinocultura no Brasil como ao crescimento da produção agrícola. O aumento da produção, conseqüentemente resulta em maior quantidade de resíduos, evidenciando a necessidade de tratamento adequado fim de minimizar o impacto ambiental.

Segundo Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) em 2015 foram produzidas no Brasil 41,3 milhões de cabeças de suínos no ano, um total 3,42% maior que o registrado em 2014. Em relação às exportações em agosto de 2016 a ABPA registrou um aumento de 30,7% em relação ao mesmo período do ano anterior, tendo como principais destinos à Rússia, Hong Kong, China e Chile, respectivamente (ABPA, 2016).

Vale ressaltar ainda que o Brasil possui uma importante colocação no cenário mundial na produção agropecuária, sendo assim a atividade produz quantidades significativas de resíduos ao mesmo tempo em que demanda uma grande quantidade de energia em seus processos produtivos (MAPA, 2016).

Diante do exposto ressalta-se a importância não só da destinação adequada dos resíduos gerados com o desenvolvimento da suinocultura, mas da oportunidade de valoração destes resíduos através da produção de biogás.

Dada à importância do tema foi lançado, em junho de 2016, o projeto suinocultura de Baixa Emissão de Carbono, que é coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) com apoio do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA), com o intuito de avaliar e disseminar alternativas economicamente viáveis para o tratamento de dejetos na suinocultura. Segundo MAPA (2016) o uso de biodigestores na suinocultura permite a produção do biogás e seu posterior aproveitamento na geração de energia térmica, elétrica e mecânica.

No que diz respeito à produção agrícola Brasileira, em 2015 foram produzidos 209,5 milhões de toneladas de grãos, aumento de 8,2%, sobre da produção de 2014 de 193,62 milhões de toneladas (IBGE, 2015). A Agricultura no Brasil é uma atividade sólida e produtiva. O país reúne inúmeras vantagens comparativas que o fazem capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas (EPE, 2007).

Embora tradicionalmente os resíduos agrícolas sejam deixados no solo para que ocorra a reestruturação do mesmo, recentemente pesquisas tem levantado o potencial de utilização destes resíduos para gerar energia a partir da produção de biocombustíveis, dentre eles o biogás.

Forster-Carneiro et al. (2013) calculou o potencial de disponibilidade agrônômica dos principais resíduos da agricultura Brasileira, seus resultados indicam que mais de 50% destes resíduos podem ser reutilizados no contexto de biorrefinarias com a produção de vários biocombustíveis. Para Vardega, Prado e Meireles (2015) as vantagens na utilização destes resíduos estão principalmente em serem renováveis, tendo o sol como insumo energético; estarem disponíveis em grandes quantidades e também ao fato de não competirem com o uso da terra para a produção de alimentos.

Em geral, além da crescente necessidade de mitigação dos impactos ambientais causados pelas atividades agropecuárias, afirmam-se ainda, que este trabalho se justifica pelas preocupações com a segurança energética, com a recente elevação do preço da energia e com as emissões provenientes de combustíveis fósseis elevando os gases de efeito estufa. Todas estas questões tem acelerado a busca pela implantação de combustíveis renováveis como o biogás.

Revela-se a ausência na literatura de qualquer estudo científico que abranja a codigestão de resíduos da suinocultura com os resíduos das principais atividades agrícolas brasileira. Sendo estes resíduos abundantes no Brasil, este estudo proporcionará conhecimento sobre quais resíduos agrícolas podem ser utilizados na codigestão com resíduos da suinocultura e qual a proporção destes resíduos resulta na maior produtividade de biogás.

Os estudos relacionados à produção de biogás a partir de resíduos são pesquisas isoladas, na maioria realizada em laboratório. Existe uma lacuna no que diz respeito a um estudo bibliográfico que reúna estas pesquisas e identifique as condições operacionais de produção que resultem em maior produção de biogás.

Afirma-se ainda que este estudo poderá auxiliar na tomada de decisão sobre que resíduos utilizar na codigestão com resíduos suínos para aumentar a produtividade de biogás.

Por fim, a relevância vinculada a este trabalho permite expandir novas possibilidades de aprendizagem à comunidade acadêmica, agropecuária,

empresarial e governamental, ao introduzir novos conhecimentos a respeito da geração de biogás através da codigestão anaeróbica de diferentes resíduos.

Segundo a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), fazem parte às subáreas do conhecimento relacionadas à Engenharia de Produção a Gestão ambiental dos processos produtivos (gestão de recursos naturais, gestão energética, produção mais limpa, eco eficiência, e prevenção de Poluição) e engenharia de produção, sustentabilidade e responsabilidade social (desenvolvimento Sustentável em Engenharia de Produção). Contudo, estas subáreas do conhecimento relacionadas à Engenharia de Produção balizam busca por conhecimento científico com o tema que se propõe esta pesquisa.

### 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção dos objetivos estabelecidos nesta pesquisa.

Primeiramente foi realizado o levantamento bibliográfico onde foram abordados temas referentes à produção do biogás, a suinocultura e resíduos agrícolas.

Esta fase do levantamento bibliográfico foi realizada principalmente na base de dados *Science Direct*, justifica-se a escolha desta base de dados pela grande quantidade de periódicos com fator de impacto e pela disponibilidade e fácil acesso aos artigos publicados. Diante da ampla variedade de informações disponíveis nesta base de dados sobre a caracterização e aspectos da produção de biogás limitou-se a busca somente nesta base de dados.

A fim de realizar o segundo objetivo desta pesquisa, identificar os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil, foram utilizadas publicações de órgãos governamentais como EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e estatística) principalmente no que tange a figura do processo de produção de biogás, a suinocultura e a produção agrícola Brasileira.

Assim, os temas abordados e que nortearam o desenvolvimento deste estudo, os aspectos observados e os principais autores podem ser observados no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais autores, temas e aspectos observados

Tema	Aspectos Observados	Principais autores
Caracterização e aspectos da produção de biogás	Caracterização do biogás	Mata-alvarez et al. (2014).
	Engenharia do processo de produção de biogás	Bougrier, Delgenes e Carrere (2008); Carlssona, Lagerkvist e Morgan-Sagastume (2012); Nizami e Murphy (2010); SENAI (2016); Mao et al. (2015); Divya, Gopinath e Christy (2015).
	Digestão anaeróbica	Bayr et al., (2012); Pavlostathis e Giraldo-gomez (1991). Amon et al. (2007); Weiland, 2010); Chen et al. 2010); Zhang et al. (2010) ; Sahinkaya e Sevimli (2013) ; Schievano et. al., (2012); Azargoshasb et al. (2015); Yasin et al., (2011).
	Características operacionais do processo de produção do biogás	Ziganshin et al.(2013); Safley e westerman (1992); Li et al. (2012) ; Yang et al. (2015); Schievano et. al. (2012). Wang et al.(2014); Jiang et al., (2013) Zhang et al.,(2009); Creamer et al. (2010); Jabeen et al. (2015);Mao et al., (2014).
	A influência das características do substrato na produção de biogás	Divya, Gopinath e Christy (2015); Pavlostathis e Giraldo-Gomez (1991); Wartell et al. (2012). Mata-Alvarez et al. (2014); Wang et al. (2010); Ziganshin et al. (2013); Wang et al. (2012); Panichnumsin et al. (2010); Wu et al. (2010); Zhang et al. (2013); Zhang et al. (2011); Murto et al., (2004); Nielsen Uellendahl e Ahring (2007);Lahav e Morgan (2004); Fernández, Pérez e Romero (2008); Guendouz et al., (2012); Ward et al. (2008).
	Codigestão anaeróbica de resíduos	Mata-Alvarez et al. (2014); Wang et al. (2012); Zhang et al., (2013); Mao et al. (2015);
Caracterização e aspectos da suinocultura	A suinocultura no Brasil	Ito et al. (2016); Miele (2006); MAPA (2016); Amaral, et al (2006). ABCS (2014).
	Resíduos da suinocultura	KUNS et al. (2009); XU, Adair E Deshusses (2016); MAPA (2016);Oliveira (2003).
	A produção de biogás com resíduos da suinocultura	Mata-Alvarez et al. (2014); (Ward et al., 2008);Angelidaki et al. (2011); Hansen et al. (1998); Deng et al., 2014), (Dong et al. (2010); Chen et al. (2015); Moller (2003), Moller (2003); Kinyua , Cunningham e Ergas (2014); Oliveira (1993)
	A codigestão anaeróbica dos resíduos da suinocultura	Weiland (2000); Murto et al. (2004); Ward et al. (2008); Angelidaki e Ahring (1997); Weiland (2006); Braun et al. (2003); Mata-Alvarez (2014); Wang et al. (2009); Wu et al. (2010).
Os resíduos Agrícolas	Características dos resíduos agrícolas	EPE (2007), Bhattacharya et al. (2005); Forster-Carneiro et al. (2013); Scarlat et al. (2015). Vardega, Prado e Meireles (2015); Nayal, Mammdov e Ciliz (2016); Alaviejehe e Soheila (2016).
	Os resíduos agrícolas no Brasil	Forster-Carneiro et al. (2013); Sims et al. (2010); EPE (2007), IBGE (2017).
	Os principais resíduos agrícolas no Brasil	EPE, (2007); Cabrera et al. (2015); Abdulkhania et al. (2016); Kelbert et al. (2015); Graham et al. (2007); Kim E Hong (2001); Zheng et al. (2014); Vardenga, Prado e Meireles (2015); Rabemanolontsoa et al. (2011); Chen et al. (2008); (Benjamin, Cheng, e Görgens (2013); Sindhu et al. (2016) , IBGE(2017).

Fonte: Autoria própria

Identificados os fatores que impactam na produção de biogás e os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil, iniciou-se uma pesquisa na base de dados *Science direct*, diante do pequeno número de artigos encontrados, incluíram-se as bases de dados Scopus e Web of science.

Os resultados desta pesquisa foram obtidos através de dados secundários, obtidos na literatura entre os anos de 2007 a 2017. Delimitou-e como escopo os artigos que continham somente os resíduos estipulados e que apresentavam informações sobre a produção de biogás a partir destes resíduos. As palavras chaves utilizadas, número de artigos encontrados são demonstrados na tabela 6.

**Tabela 1 - Pesquisa bibliométrica resíduos suínos e resíduos agrícolas**

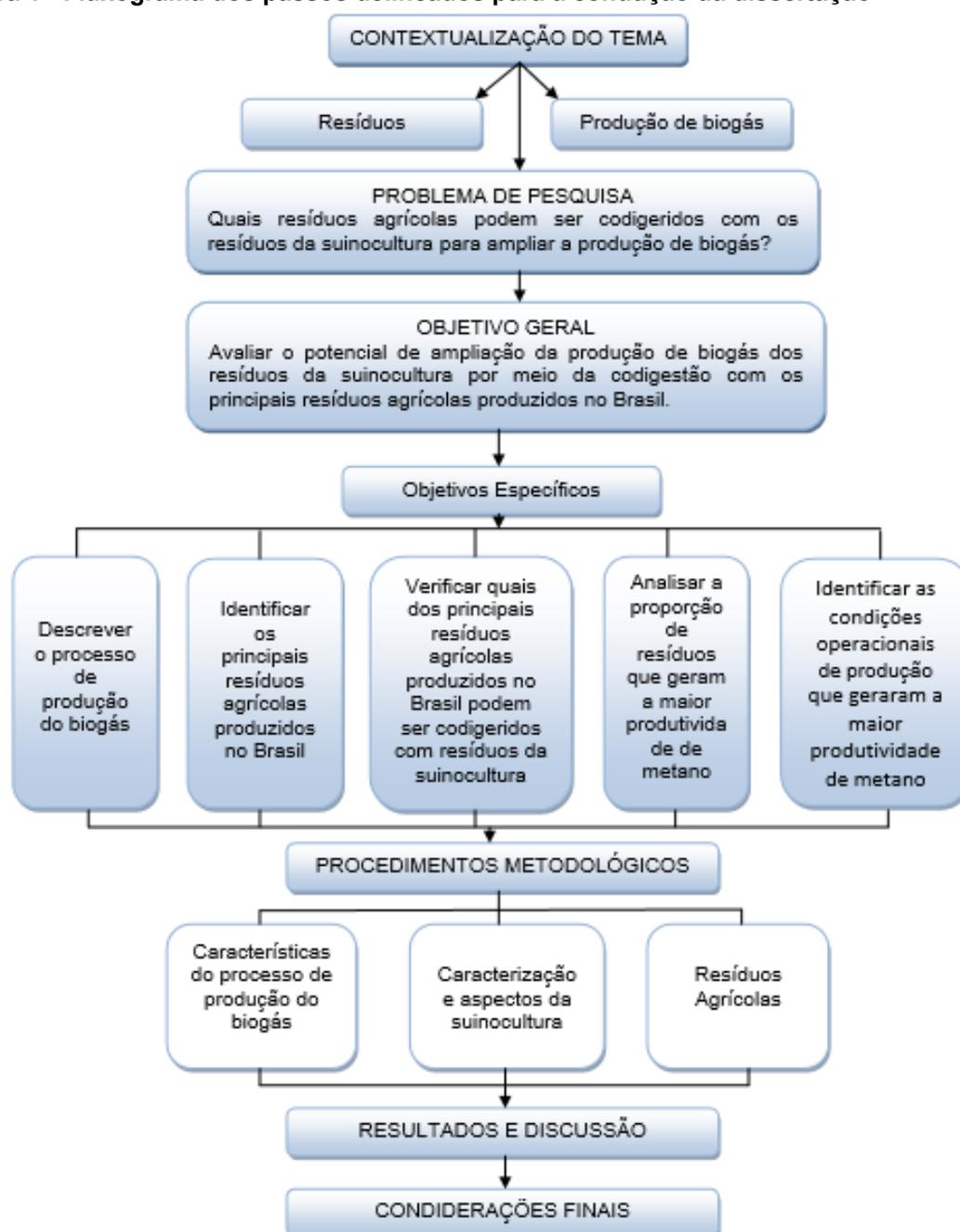
Combinação de Palavras chave		Science Direct	Web of Science	Scopus	Dentro do escopo	Após exclusão dos repetidos
anaerobic codigestion	swine waste	17	10	34	4	0
anaerobic codigestion	swine residues	5	5	12	3	0
anaerobic codigestion	corn straw	11	4	5	1	3
anaerobic codigestion	corn waste	15	3	12	3	0
anaerobic codigestion	corn residues	6	2	2	3	0
anaerobic codigestion	rice waste	22	8	12	5	3
anaerobic codigestion	rice residues	6	3	2	5	0
anaerobic codigestion	rice straw	19	8	15	3	1
anaerobic codigestion	Soy straw	0	0	0	0	0
anaerobic codigestion	Soy waste	0	0	0	0	0
anaerobic codigestion	Soy residues	0	0	0	0	0
anaerobic codigestion	sugar cane waste	0	1	0	0	0
anaerobic codigestion	sugar cane residues	0	0	0	0	0

**Fonte: Autoria própria**

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de fornecer uma visão geral do desenvolvimento deste estudo, a Figura 1 ilustra um fluxograma dos passos delineados para a condução da dissertação.

Figura 1 - Fluxograma dos passos delineados para a condução da dissertação



Fonte: Autoria Própria

## **2 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre o processo de produção de biogás e os fatores que definem a quantidade de biogás e o percentual de metano resultantes do processo. O capítulo divide-se em seis seções, a primeira busca caracterizar o biogás. A segunda busca ilustrar brevemente o processo de produção de biogás como um todo, desde a preparação para a produção, a produção e o subproduto gerado, o fertilizante seguido do tratamento que segue a produção do biogás para que possa ser utilizado.

A seção 2.3 tem como objetivo ilustrar o processo de digestão anaeróbica por meio do qual o biogás é produzido. Cada fase do processo biológico é importante e impactará a produção final de biogás.

Em sequência, a quarta seção descreve os fatores operacionais que influenciam diretamente na produção de biogás. A operação do biodigestor também influenciara na quantidade de biogás produzido.

A quinta seção trata das características do substrato, que também influenciara diretamente na quantidade de biogás produzido.

E, por fim, a seção 2.6 aborda a codigestão anaeróbica utilizada como meio de alavancar a produção do biogás através da digestão simultânea de substratos que se complementem, resultando em maior produção de biogás.

### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS**

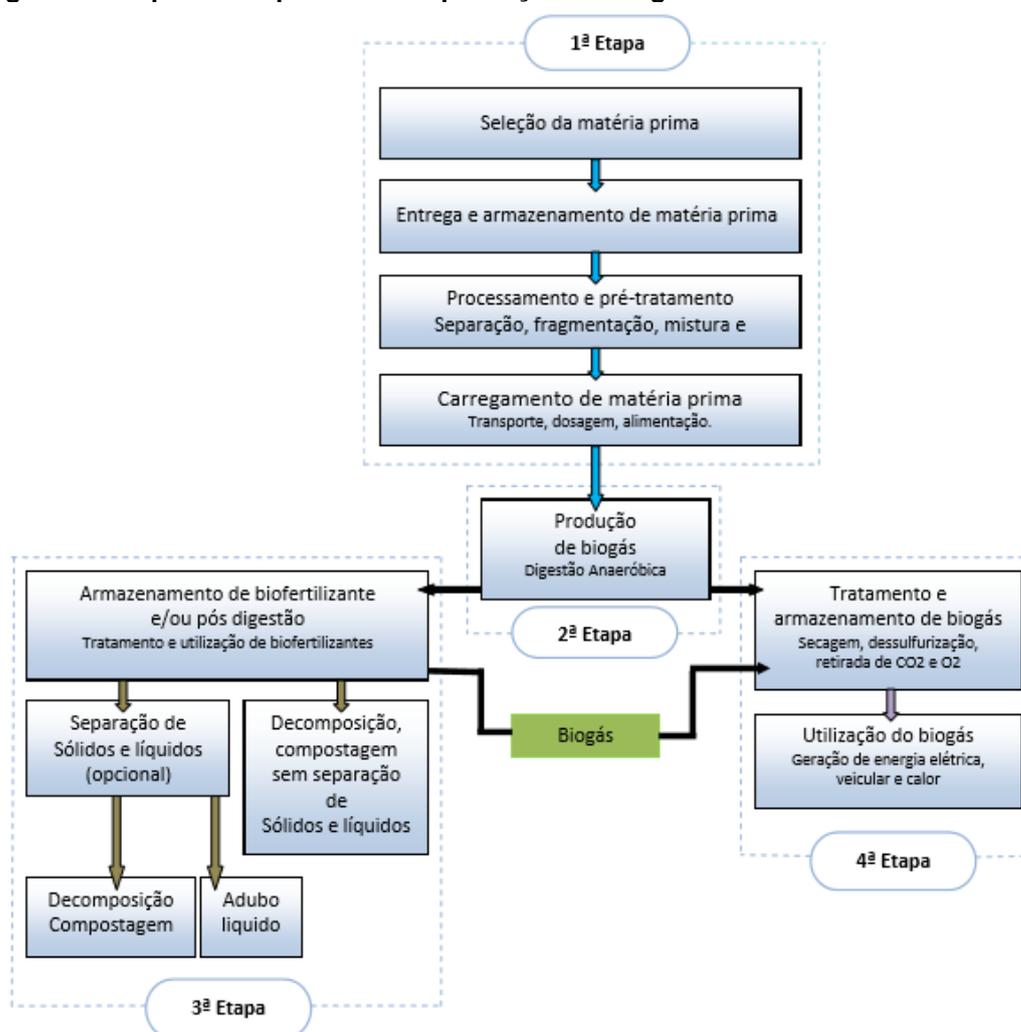
O biogás é o principal produto da DA, tratamento biológico da matéria orgânica na ausência de oxigênio. É composto por uma mistura de gases, sendo os principais o metano (50-75%) e o dióxido de carbono (25-50%), com pequenas proporções de outros componentes como nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

A composição dos produtos finais recebe influência, principalmente, dos substratos utilizados, da técnica de fermentação empregada e das diferentes tecnologias de construção dos biodigestores (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

## 2.2 ENGENHARIA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás ocorre por uma série de etapas pré e pós DA. Estas etapas consistem nas fases de escolha do substrato a ser utilizado, preparação para a fermentação, na DA propriamente dita, na purificação do gás produzido e a destinação do biofertilizante. A Figura 2 ilustra o esquema do processo de produção do biogás:

Figura 2 - Esquema do processo de produção de biogás



Fonte: Adaptado de FIEP (2016)

Este Trabalho delimita-se na fase de pré-tratamento, mais especificamente na escolha do substrato, dosagem e na fase de produção de biogás, ou seja, a digestão anaeróbica. As subcessões seguintes relatam brevemente o processo como um todo.

### 2.2.1 Etapa pré DA (1ª etapa)

A etapa pré-tratamento envolve os processamentos iniciais da matéria prima antes da DA. O processo inicia com a seleção da matéria prima a ser utilizada, a entrega e o armazenamento da matéria prima, seguido pré-tratamento, que é uma fase opcional que tem como objetivo melhorar a degradabilidade do substrato e o carregamento do biodigestor, o que inclui o transporte e dosagem do conteúdo (SENAI, 2016).

#### 2.2.1.1 A seleção da matéria prima

A escolha da matéria-prima para a produção de biogás impactara diretamente na produção de biogás. A melhoria da produção de metano se dá principalmente em virtude dos resíduos alocados no biodigestor, da escolha da mistura de substratos que se complementem, contudo é primordial a escolha do melhor cosubstrato, com o objetivo de criar sinergias que favoreçam a diluição compostos nocivos a fim de aperfeiçoar a produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

#### 2.2.1.2 O armazenamento da matéria prima

O armazenamento da matéria prima pode ser realizado através de reservatórios de concreto ou metal. O tamanho do local de armazenamento deve considerar a taxa de alimentação dos biodigestores e a necessidade de estocagem da matéria-prima (SENAI, 2016).

Conforme as características do substrato a ser digerido, pode ser necessária a instalação de tanques de higienização. Estes espaços são construídos em aço, que permitem aplicar tratamento térmico com a finalidade de destruir bactérias e outros organismos prejudiciais (BOUGRIER, DELGENES e CARRERE, 2008). As dimensões e operacionalidade se dão de acordo com as demandas do processo.

A matéria prima a ser digerida pode ser disposta em tanques de carga, produzidos de concreto armado, para facilitar a alimentação do biodigestor. Geralmente são localizados próximos e em posição mais elevada do que o

biodigestor o que dispensa o uso de bombas e equipamentos de transporte (SENAI, 2016).

#### 2.2.1.3 Processamento e pré-tratamento

Diante de substratos de difícil degradabilidade, pode ser necessária uma etapa adicional de pré-tratamento. Várias estratégias têm sido estudadas em laboratório com o intuito de melhorar a eficiência da degradação e reduzir o tempo de retenção hidráulica (TRH) e assim superar as limitações da hidrólise melhorando o desempenho do processo. Neste sentido estratégias como eletrólise (ZHEN et al., 2014), tratamento alcalino (Li et al., 2012), ultrassom (YAN et al. 2010), tratamento mecânico (NAH et al., 2000) e tratamento térmico tem sido aplicados, demonstrando bons resultados (BOUGRIER, DELGENES e CARRERE, 2008). No entanto a maioria destas técnicas ainda não são aplicáveis em grande escala devido a elevação dos custos de produção.

A codigestão anaeróbica tem sido utilizada como uma forma de baixo custo, portanto viável em grande escala para melhorar a degradabilidade dos substratos, melhorando a produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

#### 2.2.1.4 O carregamento da matéria-prima

Após a homogeneização e aplicação opcional do pré-tratamento o substrato esta pronto para ser alocado no biodigestor. Nesse sentido, a introdução dos elementos líquidos é realizada através de tubulações e de bombas interligadas (SENAI, 2016).

Quando se trata de conteúdo pastoso ou sólido faz-se necessário o uso de equipamentos específicos como pistões de alimentação, os transportadores helicoidais e os separadores de rosca. A alimentação de substratos para a DA seca é feita por meio de pás carregadeiras. Importante destacar que muitas vezes materiais sólidos estão presentes, misturados ao líquido, exigindo atenção na escolha do equipamento adequado (SENAI, 2016).

### 2.2.2 A Produção de Biogás (2ª etapa)

A obtenção do biogás se dá por meio do tratamento de substratos através do digestor anaeróbico. Existem diferentes modelos de biodigestores anaeróbicos. Normalmente os modelos se diferem quanto ao número de compartimentos e automatização. Os Digestores são basicamente compostos por um local onde se dispõe a matéria-prima, um tanque de digestão, uma unidade de recuperação de biogás, presença ou não de agitadores e um trocador de calor para conservar a temperatura necessária para a digestão bacteriana (MAO et al., 2015).

O bom desempenho do Biodigestor depende da manutenção e da temperatura média, normalmente, de 39°C aproximadamente, segundo Divya, Gopinath e Christy (2015) as variações de temperatura no digestor podem resultar na a formação de espuma, o que vai impactar fortemente no rendimento total de biogás, sistemas de grande escala precisam de temperatura constante.

Para Nizami e Murphy (2010) aperfeiçoar o projeto do digestor consiste em obter a maior carga orgânica com o menor tempo de retenção hidráulica possível e rendimentos elevados de metano. Parâmetros operacionais como o número de tanques, heterogeneidade da mistura, junto com as propriedades da matéria prima devem ser levadas em consideração, na fase da concepção do digestor.

Ainda no que diz respeito ao digestor anaeróbico, os estágios que compõe a DA podem ocorrer em um tanque ou em dois tanques. A DA em uma fase permite que todas as etapas e processos microbianos sejam completados em um único reator, incorporando armazenamento e coleta de gás. Quando as fases microbianas são separadas em dois tanques, as fases de hidrólise e acidificação podem ocorrer no primeiro reator e as fases de acetogênese e metanogênese ocorrem no segundo reator. O conceito de digestão de duas fases aperfeiçoa o processo de digestão, resultando em rendimentos mais elevados de biogás (NIZAMI e MURPHY, 2010).

As configurações do digestor além de um ou dois estágios também se diferem em molhado, seco e semi seco, no caso dos digestores de biomassa do lote ou digestores contínuos, digestores de alta taxa. Desta forma a concepção dos bio digestores podem ter abordagens diferentes, que devem ser avaliadas a fim de obter as condições de maior rendimento de biogás (NIZAMI e MURPHY 2010).

### 2.2.3 O Armazenamento do Biofertilizante (3ª etapa)

Subproduto da produção de biogás, o biofertilizante é uma mistura de matéria orgânica parcialmente degradada, biomassa anaeróbia e matéria inorgânica, este pode ser utilizado como adubo orgânico ou condicionador de solo, pois contém uma quantidade considerável de nutrientes (ASTALS, NOLLA-ARDEVOL e MATA-ALVAREZ, 2012).

Segundo SENAI (2016) após a retirada do digestor anaeróbico o biofertilizante pode ser disposto em tanques ou lagoas para estabilização, permanecendo em repouso até o momento da utilização, respeitado o tempo mínimo de cerca de 30 a 40 dias. Isso por que após a retirada do digestor pode ocorrer de o fertilizante não estar totalmente esgotado, ou seja, continuar o processo de fermentação devido ao encurtamento do tempo de permanência do material no digestor (ASTALS, NOLLA-ARDEVOL e MATA-ALVAREZ, 2012).

O produto pode ser utilizado na forma líquida ou sólida, neste caso necessitando de uma etapa de secagem, que pode ser realizada utilizando o próprio biogás (SENAI, 2016).

Ainda segundo SENAI (2016) o processo de digestão anaeróbica conserva em até 99% do nitrogênio presente no biofertilizante, na forma orgânica ou de amônia. O biofertilizante pode ser utilizado na agricultura, tanto em cultivos alimentares quanto paisagísticos, ou ser comercializado.

### 2.2.4 Tratamento e Armazenamento do Biogás (4ª etapa)

Para que o biogás possa ser utilizado faz-se necessário o tratamento do mesmo, corrigindo propriedades naturais resultantes da decomposição de modo a atender às especificações técnicas dos equipamentos de conversão a energia (SENAI, 2016).

Existem diferentes meios de remover os componentes não combustíveis (como gás carbônico, ácido sulfídrico e água), aumentando o poder calorífico e a eficiência dos processos de conversão do biogás em energia. Além disso, pode permitir que o biogás purificado e inserido nas redes de distribuição de gás natural (SENAI, 2016).

O procedimento de limpeza e purificação consiste, essencialmente, em isolar o metano dos outros constituintes. Normalmente, envolve vários estágios, cuja combinação assegura a pureza do biometano. Basicamente, as etapas se resumem em dessulfurização (remoção de ácido sulfídrico), secagem (drenagem de água) e retirada de gás carbônico. Dependendo da aplicação do biogás, faz-se necessário maior ou menor grau de pureza e, portanto, o tipo de tratamento a ser utilizado deve levar em consideração a concentração final desejada desses componentes (SENAI, 2016).

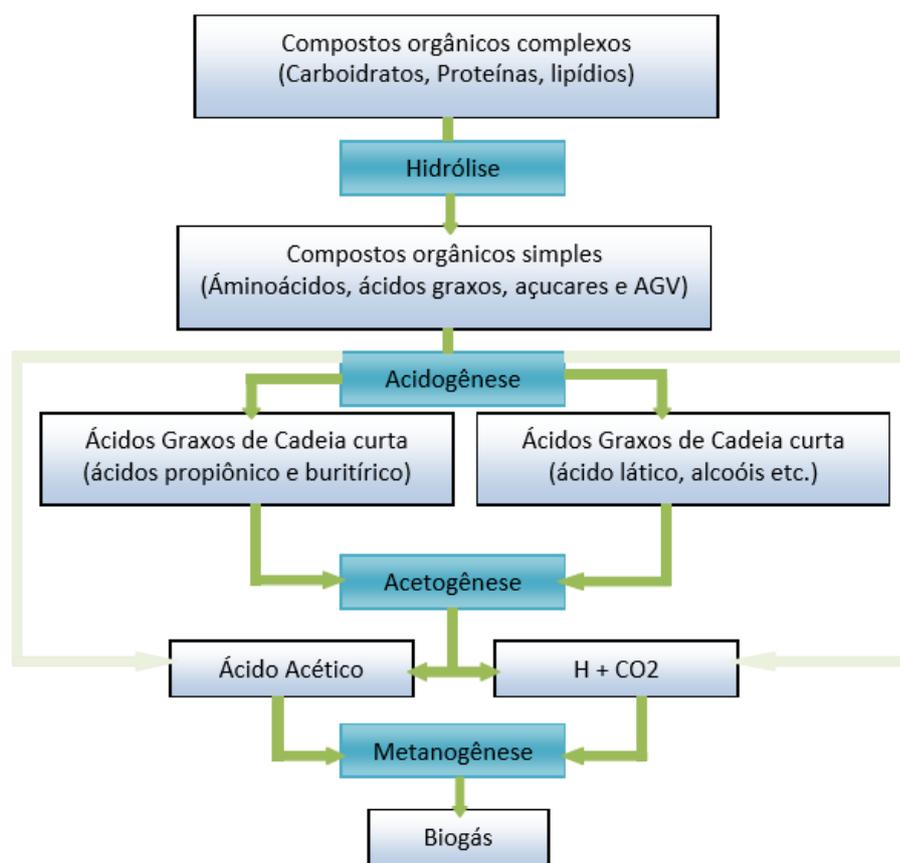
### 2.3 A DIGESTÃO ANAEROBICA

O processo de DA consiste em uma sequência de etapas bioquímicas de conversão de matéria orgânica no interior do biodigestor, na ausência de oxigênio, tendo como principal produto o biogás (BAYR et al., 2012).

A DA pode ser realizada a partir de diversas matérias-primas, desde que eles contenham substratos como hidratos de carbono, proteínas, gorduras e celulose (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991). Este processo requer um equilíbrio entre os parâmetros de design do digestor, propriedades químicas e físicas dos resíduos de entrada (AMON et al., 2007; BAYR et al., 2012). As condições no interior do digestor e aspectos biológicos de lamas ativadas (mistura completa), têm que estar em um equilíbrio correto a fim de realizar a remoção de nutrientes ideal e taxa de geração de biogás (MAO et al., 2015).

O processo de DA consiste em quatro diferentes fases: Hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991). Um dos benefícios da otimização do processo, que contribuiu para um crescente interesse por esta tecnologia, reside na conversão da maior parte da carga poluente do efluente numa fonte energia, o biogás (CHEN et al. 2010). A figura 3 demonstra as fases do processo de DA do material orgânico, com indicação das reações específicas que ocorrem em cada fase que até o produto final, o biogás.

**Figura 3 - Processo de digestão anaeróbica**



Fonte: SENAI (2016)

Todas as etapas da DA para a produção de biogás devem estar em equilíbrio, o desempenho adequado do processo biológico exige a perfeita coordenação de cada estágio da decomposição. A DA representa um sistema integrado envolvendo a degradação e estabilização da matéria orgânica, por um consórcio de micro-organismos que são sensíveis a variações nas condições de funcionamento aplicadas. Assim se o processo de DA for inadequado, torna-se instável resultando na redução de produção do biogás (WEILAND, 2010).

### 2.3.1 Hidrólise

O primeiro estágio da decomposição é a hidrólise, nesta fase compostos em grande parte insolúveis, compostos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios são transformados em aminoácidos, açúcares e ácidos gordos de cadeia

longa. O processo se dá através de bactérias hidrolíticas, as quais liberam enzimas que decompõem o material através de reações bioquímicas (BATSTONE e JENSEN, 2011).

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

Recentemente, estratégias para melhorar a hidrólise, ou seja, os métodos de desintegração têm sido apresentados de forma combinada na literatura, aumentando a eficiência da produção de biogás. Métodos como tratamento alcalino, térmico, ultrassons e tratamentos de micro-ondas, têm sido combinados entre si, a fim de atingir um grau mais elevado de desintegração, conseqüentemente, melhora da produção. Kim et al. (2010) aplicaram um pré tratamento de ultrassom juntamente com o tratamento alcalino sobre a desintegração de lodo de esgoto. Quando o pré-tratamento foi aplicado individualmente o aumento da solubilização foi de 50%, quando combinados o tratamento de ultrassom e alcalino atingiram 70%. Zhang et al. (2010) demonstram o aumento do rendimento de metano através do pré tratamento ultrassom e térmico respectivamente. Sahinkaya e Sevimli (2013) afirmam que a desintegração e a biodegradabilidade anaeróbica foram significativamente melhoradas pela combinação pré-tratamentos de ultrassom e tratamento alcalino, resultando na redução do TRH pela metade.

### 2.3.2 Acidogênese

A segunda fase da biodigestão, denominada acidogênese, corresponde à fermentação e a oxidação anaeróbica. Nesta fase bactérias fermentativas acidogênicas agem sobre os compostos intermediários, como aminoácidos, sacarídeos e ácidos gordos e são transformados em AGV, como os ácidos propiônico e butírico, ou em outros produtos orgânicos ácidos, tais como lactato, ou em alcoóis, por exemplo, etanol e butanol (FRITSCH, HARTMEIER, e CHANG, 2008).

A concentração de hidrogênio intermediário impacta os tipos de compostos formados nesta fase do processo (BATSTONE E JENSEN, 2011). O desempenho da acidogênese no reator é de importância primordial, especialmente durante a estabilização anaeróbica de duas fases de resíduos, a fim fornecer os compostos intermediários mais adequados para a atividade subsequente (SCHIEVANO et. al., 2012).

Azargoshasb et al. (2015) discorre sobre as atividades dos microrganismos no biodigestor, relatando que a oxidação anaeróbica do butírico é mais favorável do que a conversão de ácido propiônico, devido a de inibição de AGV sobre a conversão anaeróbica de butírico ser semelhante ao de propionato de metilo. Ambos diminuem o nível de pH no reator, o que pode contribuir para a inibição do crescimento de microrganismos responsáveis pelas fases acetogênicas e metanogênicas. Além disso, em termos de termodinâmica, o ácido propiônico impede a conversão anaeróbia de butírico. Ambos, propiônico e butírico, inibem a conversão metanogênica de etilo, impedindo o crescimento das bactérias metanogênicas acetoclásticas, responsáveis pela transformação do acetato em metano.

O controle do pH é fundamental nesta fase da DA, sabe-se que se que o pH é um dos parâmetros importantes que influenciam a eficiência da produção biogás (SCHIEVANO et. al.,2012). Um pH baixo entre 5 e 6 é propício para a produção de hidrogênio, inibindo a produção da atividade metanogênica que é muito limitada e exige uma gama estreita de pH entre 6,5 e 7 (YASIN et al., 2011).

### 2.3.3 Acetogênese

A acetogênese caracteriza-se como a terceira fase do processo, trata-se 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 microrganismos transformam os AGV em etilo, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> que dão origem ao acetato.

Nesta fase elevadas quantidades de hidrogênio impedem a formação de compostos intermediários da acidogênese, levando ao acúmulo de ácidos orgânicos que impedem a metanogênese. Tais como ácido propiônico, ácido isobutírico, ácido

isovalérico, ácido capróico. 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 originando um meio propício para as bactérias acetogênicas (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991).

#### 2.3.4 Metanogênese

Na metanogênese, o último estágio da 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. Os organismos metanógenos acetoclásticos a partir da decomposição do ácido acético (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991; AMANI, NOSRATI e SREEKRISHNAN, 2010)

Os organismos metanogênicos, estritamente anaeróbicos, são o elo mais sensível do processo, exigindo que as condições operacionais sejam concebidas para se adequar as suas necessidades (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991).

### 2.4 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIOGÁS

Os fatores de operação do biodigestor estão diretamente relacionados com a quantidade de biogás que será produzido, um processo instável pode levar a falhas no digestor anaeróbico que podem em alguns casos serem irreversíveis (ASTALS, NOLLA-ARDEVOL e MATA-ALVAREZ, 2012).

As subseções seguintes descrevem a influência de cada fator sobre a produção de biogás.

#### 2.4.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais fatores que influenciam os consórcios bacterianos na DA (ZIGANSHIN et al.,2013). A DA pode ser realizada em três

gammas diferentes de temperatura termofílica (45-60 °C), mesofílica (20-45 °C), e psicofílica (<20 °C).

As temperaturas psicofílicas têm sido menos aplicadas do que as temperaturas mesofílicas ou termofílicas, isso por que temperaturas mais baixas levam a diminuição da atividade do consórcio microbiano, apresentando menor rendimento, portanto não são economicamente atraentes (SAFLEY e WESTERMAN 1992).

A DA em condições mesofílicas tem sido mais aplicadas, temperaturas entre 35°C e 39°C têm sido relatadas como eficientes. Para Li et al. (2012) o aumento da temperatura operacional tem tido pouca vantagem, quando se analisa os custos envolvidos.

Ainda segundo Li et al. (2012) estabilidade temperatura do processo esta relacionada com melhores rendimentos de biogás, melhor desempenho do biodigestor, tanto a produção do biogás como o conteúdo de metano tem se mostrado mais elevados em temperaturas adequadas.

O deslocamento de temperatura de condições mesofílicas para termofílicas levou a mudança da população de micro-organismos no biorreator, resultando no aumento de algumas espécies e redução de outras (ZIGANSHIN et al., 2013). Quando há necessidade de mudança de temperatura, a estratégia mais comum utilizada é que esta seja realizada lentamente a fim de que ocorra a adaptação dos micro-organismos (BOUSKOVA et al., 2005).

#### 2.4.2 pH

A influência do pH sobre a produção de biogás a partir de resíduos tem sido amplamente investigada, estudos indicam que o rendimento de biogás mostra-se mais elevado quando ph é monitorado de forma eficaz (YANG et al., 2015).

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

Se o pH do resíduo a ser biodegradado estiver fora do intervalo ótimo, a capacidade tampão é insuficiente, ocorrendo inibição do processo anaeróbico. É denominada capacidade tampão ou alcalinidade a capacidade para neutralizar os

ácidos que proporcionam a mudanças rápidas e significativas no pH. Correções do pH podem ser realizadas através de compostos como bicarbonato, carbonato e hidróxidos. Uma solução diluída de base, tal como NaOH ou de cal, ou uma solução de ácido tal como HCl, pode ser utilizado para ajustar o pH (JIANG et al. 2013).

Um pH baixo entre 5 e 6 é propício para a produção de hidrogênio, inibindo a produção da atividade metanogênica (YASIN *et al.*; 2011). Wang et al. (2014) relatam quem os micro-organismos metanogênicos exigem um pH limitado entre 6,5 e 7. Cazier et al. (2015) discorre que o pH baixo pode ser resultado da acumulação de AGV tendo um forte impacto sobre a metanogênese. Como H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> são produzidos por bactérias acetogênicas e acidogênicas, gases dissolvidos podem acumular transitoriamente em reatores com elevado teor de sólidos, com redução do crescimento dos micro-organismos metanogênicos a um pH mais elevado entre 7 e 8. Assim, um alto teor de sólidos, a acumulação local de gases pode resultar na inibição do processo metanogênese.

Controlar o nível de pH é essencial para garantir o crescimento adequado dos micro-organismos. O controle do pH proporciona a redução da toxicidade de amônia, devido à alta concentração de amônia livre. A composição de AGV também é significativamente afetada pelo pH. Jiang et al. (2013) demonstram a variação da concentração de AGV no reator sob diferentes condições de pH. Em todas as condições, a concentração mostrou mudanças rápidas no início do processo, logo se estabilizando. Quando o nível de pH foi ajustado para 6,0, a atividade da enzima hidrolítica foi mais elevada, o que resultando na maior concentração de AGV. Contudo a velocidade da hidrólise é dependente do pH. Deve-se ressaltar que ambas as bactérias metanogênicas e acidogênicas têm níveis de pH ideais, num sistema de estágio único convém adaptar o pH as condições ideais da população metanogênica devido a maior sensibilidade dos micro-organismos (ZHANG et al., 2009).

#### 2.4.3 Carga Orgânica Volumétrica (COV)

A carga orgânica consiste na quantidade de sólidos voláteis depositados no biodigestor diariamente. O aumento da produção de metano está relacionado com o

aumento de COV, no entanto se um determinado valor de COV é excedido o processo torna-se instável. Isso por que a cada novo volume adicionado no biodigestor a atividade bacteriana é inibida temporariamente, durante os estágios iniciais de fermentação (CREAMER et al., 2010).

Ainda segundo Creamer et al. (2010) Esta inibição ocorre por que a COV muito elevada, conduz a uma atividade de hidrólise e acidogênese maior que a da metanogênese, aumentando a produção de AGV, que eventualmente pode levar a uma acidificação irreversível do biodigestor. Contudo o pH do biodigestor diminui, seguindo-se a inibição da hidrólise, de modo que as bactérias restritas a metanogênese não são capazes de converter a elevada quantidade de AVG em metano.

A quantidade de COV suportada na DA tem sido abordada na literatura. Jabeen et al. (2015) investigou o efeito da COV na codigestão de resíduos alimentares e casca de arroz em reator anaeróbio contínuo em escala piloto, o estudo foi realizado com COV de 5, 6 e 9 kg, em temperatura mesófilas (37°C). A produção de biogás diária atingiu 196 e 236 litros por dia, respectivamente, com COV de 5 e 6 kg. No entanto a taxa de carregamento de 9 kg, a produção de biogás diária diminuiu drasticamente de 196 litros para 136 litros por dia.

O aumento da COV na codigestão de estrume de vaca e mistura de silagem de capim numa planta piloto foi investigado. Com a alimentação de 70% do substrato o rendimento metano foi mais elevado, vale ressaltar que o maior rendimento foi obtido do que durante a fase de arranque, ou seja, na fase inicial do processo. Aumentando a proporção para 80% do substrato levou a diminuição da proporção de metano abaixo 48%. O que caracteriza um colapso processo pelo excesso de COV (COMINO, ROSSO e RIGGIO, 2010).

Jiang et al. (2013) em um estudo piloto demonstram a variação da concentração e composição de AGV com COV de 5, 11, e 16g, quando a COV foi de 5g as concentrações de AGV e demanda química de oxigênio (DQO) aumentaram nos primeiros 7 dias, seguindo estável até o fim do experimento. Em uma COV de 11g, o estado estacionário foi alcançado no 14º dia. No entanto, em um COV 16g, a concentração de AGV aumentou até o 12º dia, quando houve redução acentuada por 5 dias. Em outro teste a carga orgânica foi reduzida de 16 a 10 g desde o 14º dia até o fim do experimento para evitar a falha do reator. Após o ajuste, houve estabilidade na concentração de AGV.

#### 2.4.4 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

O TRH consiste no tempo necessário para que a matéria orgânica seja biodegradada dentro do reator. A literatura mostra que na fase inicial da digestão anaeróbica a produção de biogás é mais elevada, diminuindo gradualmente à medida que se aproxima da conclusão. No entanto TRH maiores melhoram a capacidade de tamponamento, elevando a proteção contra componentes tóxicos advindos dos substratos, proporcionando também a aclimatação biológica (MAO et al., 2014).

O maior TRH está associado a maior redução da massa dos sólidos voláteis totais, rendendo mais biogás acumulado. A concepção do tempo de retenção ocorre em função da disposição final das lamas digeridas. O tempo de retenção pode ser relativamente alto ou baixo, se aplicadas na terra como fertilizantes ou incineradas, respectivamente (MAO et al., 2014).

Os micro-organismos metanogênicos necessitam de mais tempo para se regenerar, exigindo um tempo de retenção de 10 a 15 dias em média, a fim de evitar o risco de sua lavagem. Por outro lado, a redução do TRH, principalmente em plantas de escala industrial ajuda na redução do custo do processo de produção de biogás, devido à redução do volume do digestor (NGES e LIU, 2010). Contudo o TRH e COV devem estar em equilíbrio, para que a digestão anaeróbica ocorra de forma eficiente.

#### 2.5 A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSTRATO NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A escolha do substrato deve estar associada primeiramente a sua disponibilidade ao longo do ano, de forma que a produção de biogás seja rentável. O acesso à matéria-prima com baixo custo, agregada à demanda pela matéria-prima adequada, tem sido reconhecido como uma dificuldade significativa associada com a produção de biogás no cenário atual (DIVYA, GOPINATH e CHRISTY 2015).

As variações de rendimento do biogás de diferentes tipos de biomassa estão relacionadas com a liberação de energia para o ambiente durante vários processos metabólicos ocorrem na DA, com isso a composição da biomassa a ser utilizada vai impactar o rendimento de metano (PAVLOSTATHIS e GIRALDO-GOMEZ, 1991).

O uso das grandes quantidades de resíduos, gerados pelas atividades agroindustriais, reduz o impacto ambiental ao mesmo tempo em que satisfaz a demanda de resíduos para geração de energia através da biodigestão (DIVYA, GOPINATH e CHRISTY, 2015).

No entanto um fator crítico na utilização de resíduos industriais no biodigestor é a falta de conhecimento sobre a possível presença de compostos tóxicos que podem ser inibitórios para os micro-organismos, especialmente aos metanogênicos (WARTELL et al., 2012). Além de que, a qualidade e composição dos resíduos industriais dependem da origem matéria prima, o processo químico utilizado para se obter o produto principal e, se existente, o tratamento de resíduos de refinação (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O rendimento do biogás está diretamente ligado com a composição do substrato. As características físicas e químicas da matéria-prima, tais como teor de umidade, sólidos voláteis, teores de nutrientes, tamanho de partícula e biodegradabilidade estão relacionadas com o rendimento do biogás e a estabilidade e processo (CHO, PARK, e CHANG, 1995).

Outros estudos estabeleceram que a relação C/N dos substratos a serem digeridos como um fator crítico, que afeta todo o processo de produção. Substratos possuem relação C/N ótima satisfazem os micro-organismos envolvidos no processo, enquanto que um desequilíbrio na proporção pode levar a instabilidade do processo (DIVYA, GOPINATH E CHRISTY, 2015).

A composição da matéria prima também afeta a diversidade dos micro-organismos presentes no biodigestor. Wang et al. (2010) constataram a alteração na comunidade microbiana presente no reator em relação a mudança do substrato. Durante a monodigestão de estrume de vaca a comunidade microbiana permaneceu estável. Porém houve grandes mudanças quando o reator foi alimentado com estrume de vaca e com até 20% de silagem de capim. Os autores constataram diferentes micro-organismos em função cosubstrato digerido.

Ziganshin et al. (2013) confirmam a presença de diferentes micro-organismos em função das características do substrato. Os autores investigaram a digestão de diferentes resíduos agrícolas em laboratório, constatando que alterações na composição de matéria-prima juntamente com a operação do biodigestor podem alterar a composição dos micro-organismos que fazem a DA.

### 2.5.1 Relação Carbono/ Nitrôgenio

A relação C/N considera os níveis de nutrientes de um substrato no sistema de digestão anaeróbica. A otimização da relação C/N no processo possibilita que a inibição por amoníaco seja evitada (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. Substratos com uma proporção demasiadamente baixa da relação C /N elevam o risco de inibição por amoníaco, que é tóxico 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 seleção criteriosa na seleção do substrato.

A relação C/N para a digestão anaeróbica tem sido relatada na literatura entre 20/35 (PANICHNUMSIN et al., 2010; WU et al., 2010; WANG et al., 2012; ZHANG et al., 2013). A codigestão de resíduos tem sido amplamente investigada na literatura para otimizar a relação C/N de diferentes substratos (MAO et al., 2015).

Zhang et al. (2011) investigaram a codigestão de resíduos alimentares e águas residuais em pocilga de criação de suínos, à melhoria do rendimento de biogás foi atribuída a estabilidade do digestor. As águas residuais que possuíam elementos como Co, Ni, Mo, Fe se mostraram com um maior potencial energético do que as com menor concentração destes elementos. O processo foi melhorado de forma significativa, uma vez que houve o equilíbrio relação C/N, aumentando a produtividade de biogás.

O esterco animal tem sido utilizado como matéria prima em todo o mundo para a produção de biogás e para recuperação de energia. Embora seja praticável, o estrume sozinho não é a forma mais eficiente para a produção de biogás devido à baixa relação carbono nitrogênio. No entanto, a produtividade pode ser melhorada através de métodos aditivos alternativos para digestor (MURTO et al., 2004).

### 2.5.2 Ácidos Gordos Voláteis

Os AGV são indicadores relevantes no processo de DA, isto é, são indicativos da atividade dos micro-organismos metanogênicos, o acúmulo dos AGV

pode ser atribuído a qualquer sobrecarga orgânica ou inibição das comunidades metanogênicas (NIELSEN, UELLEND AHL e AHRING, 2007).

Ainda segundo Nielsen Uellendahl e Ahring (2007) os AGV atuam como indicadores do processo de geração de biogás em reatores de larga escala e em escala piloto. Os reatores foram abastecidos com mistura de estrume e resíduos industriais, e mistura de farinha de carne e osso e lipídios, respectivamente. Os estudos mostraram que o propionato pode ser o melhor indicador de falha no sistema devido à sobrecarga do reator. O estudo revela que quando o propionato foi observado como critério para a COV, houve melhor eficiência no processo (NIELSEN, UELLEND AHL e AHRING, 2007).

Lahav e Morgan (2004) enfatizam a importância do aumento dos AGVs ou a diminuição proporcional na concentração de carbonato de alcalinidade no reator como primeira indicação prática mensurável que um sistema de tratamento anaeróbico está em um estado de stress.

### 2.5.3 Concentração

A concentração de sólidos totais (ST) na mistura é um parâmetro importante na concepção do substrato sólido introduzido no biodigestor. Concentração demasiadamente baixa, embora limite a possibilidade de efeitos inibitórios, resulta em atividade metabólica baixa e com menor produção de biogás. Se a concentração for demasiadamente elevada, a medição de biogás pode ser mais fiável, no entanto em situação de sobrecarga, pode ocorrer acumulação de ácidos gordos voláteis, resultando na inibição da produção de gás (FERNÁNDEZ, PÉREZ e ROMERO, 2008).

A quantidade de biogás gerada pode variar de acordo com a quantidade de ST, as plantas operam com valores de ST distintos, concentração de ST inferior a 10% é denominada processo de fermentação molhado (DENG et al., 2014), concentração entre 10% e 20% correspondem a fermentação semi seca (DONG et al., 2010) e concentração maior que 20% trata-se da fermentação a seco (ABOUELENIEN, NAKASHIMADA, e NISHIO, 2009).

Quanto maior o teor de ST, maior a inibição da DA devido à amônia, portanto menor a produção de biogás, com isso a fermentação no processo molhado acabou sendo o foco das pesquisas (CHEN et al. 2015).

Guendouz et al. (2012) sugere a produção total de metano diminuiu ligeiramente com o aumento das concentrações de ST aumentando de 10% para 25% de ST. Quando a concentração foi elevada a 35% de ST a metanogênese foi fortemente inibida.

Contudo é importante avaliar o processo mais eficaz com relação ao tipo de substrato utilizado, levando em consideração os fatores limitantes da metanogênese (FERNÁNDEZ, PÉREZ e ROMERO, 2008).

#### 2.5.4 Tamanho da Partícula

O rendimento de metano é inversamente proporcional ao tamanho da partícula do substrato, que pode influenciar na taxa de biodegradação, considerando que as fases iniciais do processo de digestão anaeróbica, em especial as etapas de hidrólise e acidogênese que são significativamente afetadas por condições físico-químicas, tais como temperatura e pH (KOMEMOTO et al., 2009).

No caso de substratos de baixa biodegradabilidade, pré-tratamentos podem ser aplicados para a redução do tamanho das partículas proporcionando o aumento da superfície disponível para os microrganismos, resultando em aumento da disponibilidade de alimento para as bactérias (IZUMI et al., 2010). Pré-tratamentos podem acelerar a hidrólise e a acidogênese do substrato e conseqüentemente melhorar a digestão anaeróbica (KIM et al. 2010; ZHANG et al. 2010; SAHINKAYA e SEVIMLI, 2013). No entanto, os efeitos de redução de tamanho de partícula como um método de pré-tratamento de no processo de digestão anaeróbica devem ser avaliados, a fim de evitar a sobrecarga orgânica.

## 2.6 CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS

A codigestão de resíduos é DA de dois ou mais substratos simultaneamente, a fim de superar os inconvenientes da digestão de um único substrato. A principal

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 COV e alavancar a produção de metano, aumentando a viabilidade econômica de plantas (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Os benefícios atribuídos codigestão incluem aumento da carga de matéria orgânica facilmente biodegradável, diluição de substâncias tóxicas, a melhoria da capacidade tampão da mistura, maior rendimento de biogás, melhor qualidade do produto digerido, e custos reduzidos (BOROWSKI, DOMAŃSKI e WEATHERLEY, 2014).

Rendimentos ótimos de produção de metano demonstram que o estrume suíno quando digeridos com substratos complementares, para Abaldea et al. (2016) o sucesso da codigestão consiste na seleção de substratos que preencham as deficiências do substrato escolhido.

Mata-Alvarez et al. (2014) constatou um crescimento expressivo nas pesquisas relacionadas a codigestão anaeróbica, mostrando a relevância do tema. A codigestão tem sido relatada como um método eficaz para a superação de diversas desvantagens ligadas às propriedades do substrato.

Substratos como, por exemplo; o lodo de esgoto que se caracteriza por baixa carga orgânica, o estrume animal tem carga orgânica baixa e elevada concentração de N, que podem inibir metanogênese, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos que possui metais pesados tóxicos para os micro-organismos, os resíduos agroindustriais são substratos sazonais, que podem carecer de N, e resíduos de matadouros incluem os riscos associados com a elevada concentração de N e AGCL, ambos os potenciais inibidores da atividade metanogênica (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Ainda Segundo Mata-Alvarez (2014) o esterco animal é o substrato principal mais utilizado na produção de biogás. No que diz respeito aos cosubstratos utilizados, os resíduos agroindustriais apresentam-se como o cosubstrato mais utilizados, seguido por fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, glicerol em bruto, soro de queijo, e resíduos lagar de azeite (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O estrume animal contém um elevado teor de azoto, o esterco de cabra contém 1,01% de azoto, o esterco de galinha 1,03% e os dejetos de suínos 0,24%. A composição elevada de azoto possibilita a codigestão com resíduos orgânicos que

são deficientes deste componente, desta forma, proporciona o equilíbrio da relação C/N e um pH adequado (ZHANG et al., 2013). Mao et al. (2015) obteve maior rendimento de biogás com a codigestão de resíduos agrícolas com esterco o que atribuiu ao equilíbrio da relação C/N e a redução dos compostos tóxicos devido a codigestão.

A codigestão de efluentes pecuários com culturas energéticas têm se mostrado importante a fim de reduzir o risco de inibição de amoníaco. A adição de culturas energéticas como de silagem de milho, com um teor de carbono elevado, equilibra a relação C / N da matéria-prima (WANG et al., 2012).

O esterco suíno é caracterizado pela alta capacidade tampão pela variedade de micro e macronutrientes necessários para o crescimento dos micro-organismos responsáveis pela DA, no entanto, o esterco suíno possui elevada concentração de nitrogênio e amônio e baixo teor de matéria orgânica (HARTMANN e AHRING, 2005). Os dejetos suínos se caracterizam ainda por, um elevado teor de água, juntamente com uma fração elevada de fibras, principal razão para a baixa produção de metano por peso (FERREIRA, DUARTE e FIGUEIREDO, 2012).

A literatura relata a codigestão de resíduos suínos com resíduos do processamento industrial (como restos da produção de biodiesel, azeite de oliva, batatas e beterraba), resíduos agrícolas (milho, arroz, trigo, capim), resíduos de cozinha, algas e lixo (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Contudo, para que codigestão anaeróbica seja bem sucedida é necessário que haja o equilíbrio de vários parâmetros da mistura de substratos, como macro e micronutrientes, relação C/N e pH. A codigestão proporciona ainda proteção a DA quanto a compostos tóxicos e melhora da biodegradabilidade (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Diante do exposto a codigestão anaeróbica se mostra uma alternativa para resolver os problemas da monodigestão melhorando a produção de biogás.

### 3 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DA SUINOCULTURA

Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre a suinocultura. O objetivo da primeira seção é caracterizar a suinocultura no Brasil. Em sua segunda seção, o capítulo aborda especificamente os resíduos gerados pela suinocultura. Por fim, a última seção apresenta o referencial teórico sobre a produção de biogás a partir dos resíduos da suinocultura.

#### 3.1 A SUINOCULTURA NO BRASIL

Até a década de 1970 a suinocultura no Brasil caracterizava-se pela pequena concentração de animais nas propriedades, no entanto os dejetos suínos não representavam perigo eminente, eram utilizados como adubo orgânico ou absorvidos pelo solo sem consequências significativas ao meio ambiente. A partir de 1970 houve a modernização do sistema de produção e forma de sistema de criação intensivo e confinado resultando na produção em escala, portanto o aumento expressivo dos dejetos (ITO et al., 2016).

A cadeia de produção de suínos divide-se em produtores independentes e produtores integrados. O primeiro trabalha de maneira autônoma, controla a produção, decisão de compra, controle de produção e comercialização dos animais. Os produtores integrados trabalham em parceria com agroindústrias que na maioria das vezes fornecem animais, insumos, assistência técnica e a comercialização enquanto o produtor é responsável pela mão de obra e infraestrutura (MIELE, 2006).

No Brasil o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é a autoridade responsável por questões sanitárias e de saúde animal dado à importância do assunto foi lançado o manual suinocultura com baixa emissão de carbono com a finalidade de propor soluções tecnológicas mais apropriadas para o tratamento de dejetos na suinocultura brasileira (MAPA, 2016).

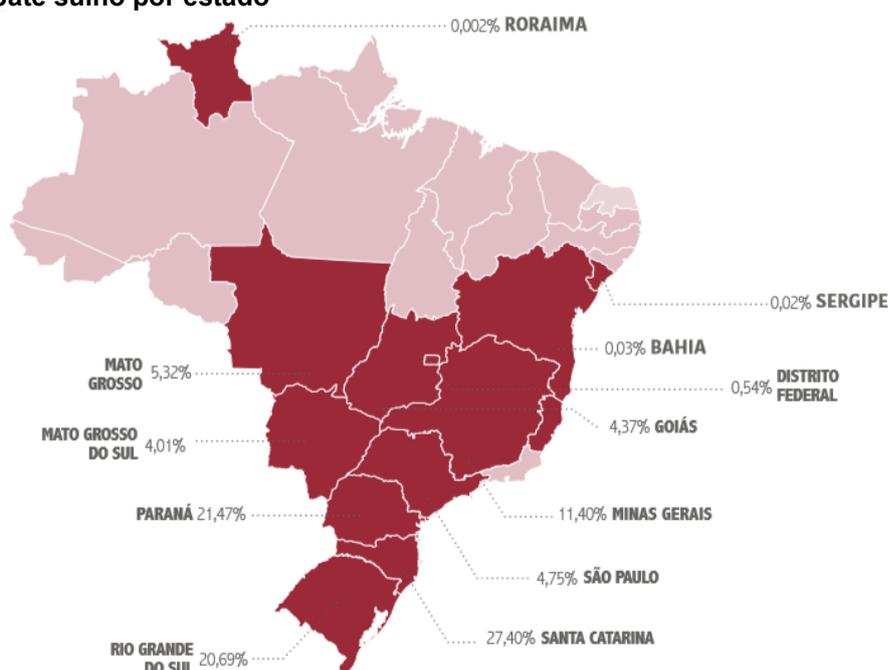
A suinocultura Brasileira passou por mudanças organizacionais e tecnológicas nos últimos 30 anos, com evolução da genética, nutrição dos animais e qualidade da carne. Houve aumento da escala de produção e redução do número de produtores, a mudança do sistema produtivo com a segregação da produção em múltiplos sítios,

em Unidades Produtoras de Leitões (UPL) e unidades de crescimento e terminação (UT), se deu de forma mais intensa entre as integrações na região Sul e Centro-Oeste e foi também adotada por parte dos criadores do Sudeste (ABCS, 2014).

As UPLs trabalham com cria e recria das matrizes, e assim desmamam os suínos com 21 a 28 dias de idade, estes permanecem na creche até dois meses e meio quando são enviados para a UT onde permanecem até 150 dias atingindo o peso final entre 100 e 110 kg (AMARAL, et al. 2006).

Atualmente a suinocultura brasileira ocupa uma posição de destaque no cenário mundial. Com um rebanho de 35 milhões de cabeças, o Brasil é o quarto maior produtor mundial de carne suína, com uma produção de 3 milhões de toneladas por ano é o quarto maior exportador mundial, com 600 mil toneladas por ano. Em 2015 84,8% da produção foi absorvida pelo Mercado interno, o consumo interno de carne suína no Brasil ocupa o sexto lugar no cenário mundial com 15 kg por habitante por ano (ITO et al., 2016). Os principais produtores são respectivamente os estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul, o volume de exportação brasileira representa 10% do volume exportado de carne suína no mundo, chegando a lucrar mais de US\$ 1 bilhão por ano (MAPA, 2016). A Figura 4 mostra o percentual de abate suíno por estado no Brasil.

**Figura 4 - Abate suíno por estado**



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

As principais regiões produtoras apresentaram concentração de alojamentos ligados às integrações ou às cooperativas, em detrimento do mercado dos suinocultores independentes. A região Sul do País é tradicionalmente a de maior expressão na produção de suínos seguida da região sudeste com um plantel de 380 mil matrizes, Minas Gerais destaca-se com 241 mil matrizes alcançando a quarta posição no país (ABCS, 2014).

Ainda segundo ABCS (2014) a expansão agrícola da região Centro-Oeste, a partir da década de 1970 impulsionou a produção de suínos com destaque para Goiás e Mato Grosso. O centro- Oeste conta com 274 mil matrizes, com uma projeção de crescimento promissora para os próximos anos balizada na produção de grãos, com isso o acesso quantitativo ao milho e à soja, que são os principais insumos na produção da ração, a abundância de água, clima favorável e topografia do solo.

### 3.2 OS RESÍDUOS DA SUÍNO CULTURA

O crescimento da produção animal tem recebido atenção devido a grande quantidade de resíduos gerados e o potencial de impacto no ar, solo e recursos hídricos (KUNS et al. 2009). Além do impacto ao meio ambiente o manuseio inadequado destes resíduos pode causar odores, liberação de vetores transmissores de doenças, agentes patogênicos no ar, diante do exposto fazem-se necessárias práticas ambientais sólidas, especialmente a adoção de sistemas de gestão de resíduos animais (XU, ADAIR E DESHUSSES, 2016).

Conhecer as características dos dejetos dos animais é fundamental para minimizar as consequências negativas do manejo e da disposição inadequada dos resíduos da produção assim como para o projeto dos sistemas de tratamento (MAPA, 2016).

Os resíduos da suinocultura são constituídos de esterco, urina, resquícios de ração e água. As características do estrume animal são variáveis entre países ou até mesmo na mesma fazenda estão sujeitas a flutuações sazonais, a alimentação do animal e consumo de água (BOURSIER et al., 2005). No Brasil, os principais centros de pesquisa e órgãos governamentais e empresas privadas como

EMBRAPA e CI Biogás têm adotado as definições de Oliveira (2003), a tabela 1 demonstra a média diária dejetos produzidos por animal segundo o autor:

**Tabela 2 - Produção média diária de esterco (kg), esterco + urina (kg) e dejetos líquidos (L) por animal por fase de criação**

<b>Categoria de Suínos</b>	<b>Esterco</b>	<b>Esterco + urina</b>	<b>Dejetos líquidos</b>
25 a 100 Kg	2,3	4,9	7,00
Porcas em gestação	3,6	11,00	16,00
Porcas em lactação	6,4	18,00	27,00
Machos	3,00	6,00	9,00
Leitão desmamado	0,35	0,95	1,40
Média	2,35	5,80	8,6

**Fonte: Oliveira (2003).**

Segundo MAPA (2016) a composição e a quantidade de dejetos variam de acordo com o manejo adotado (ciclo completo, unidade produtora de leitões, unidade de terminação), assim como os fatores zootécnicos (tamanho, raça e peso), ambientais (temperatura e umidade) e dietéticos (digestibilidade, conteúdo de fibra e vitamina). A Tabela 2 demonstra o volume de dejetos produzidos em cada ciclo de produção:

**Tabela 3 - Volume diário de dejetos líquidos (Litros/animal/dia) produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina.**

<b>Modelo de sistema de produção de Suínos</b>	<b>Massa suíno</b>	<b>Volume dejetos litro/animal/dia</b>
Ciclo completo (CC)		47,1
Unidade de produção de leitões (UPL)		22,8
Unidade de produção de desmamados (UPD)		16,2
Crechários (CR)	6 - 28	4,5
Unidade de terminação (UT)	23 - 120	2,3

**Fonte: Fundação do Meio Ambiente (2014).**

Segundo MAPA (2016) teor de nutrientes nos dejetos de suínos está condicionado a idade dos animais, alimentação, temperatura, métodos utilizados para recolher e armazenar os resíduos, umidade e quantidade de água utilizada para limpar as instalações. Entre os principais componentes poluentes dos dejetos suínos estão o nitrogênio, o fósforo e alguns microminerais, como o zinco e o cobre.

Ainda segundo MAPA (2016) As propriedades físicas, químicas e biológicas podem ser obtidas por meio de medidas qualitativas e quantitativas. A Tabela 3

expressa às características físico-químicas dos dejetos brutos de suínos na fase de crescimento e terminação:

**Tabela 4 - Volume diário de dejetos líquidos (Litros/animal/dia) produzido em sistemas especializados de produção de suínos no Estado de Santa Catarina.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>
DQO total (mg/L)	11.530	38.448	25.543
Sólidos TOTAIS (mg/L)	12.697	49.432	22.399
Sólidos Voláteis (mg/L)	8.429	39.024	16.380
Sólidos fixos (mg/L)	4.268	10.408	6.010
Sólidos sedimentáveis (mg/L)	220	850	429
MTK (mg/L)	1,660	4,5	2.374
P total (MG/L)	320	1.180	578
K total (mg/L)	260	1.140	536

**Fonte: Fundação do Meio Ambiente (2014).**

Se por um lado existe a preocupação com o desenvolvimento da suinocultura e o aumento de dejetos, por outro lado os sistemas de criação de confinamento dos animais permitem o aproveitamento potencial dos resíduos suínos, dependendo apenas de pequenas intervenções nas edificações de produção e instalação de conjuntos biodigestores, outro ponto positivo da suinocultura na produção de biogás é a alta concentração de produção, que permite maior viabilidade ao processo (MAPA, 2016).

O aumento dos custos dos fertilizantes impulsionou o aproveitamento dos resíduos orgânicos da suinocultura, somado com o custo da energia e a insegurança energética que impacta diretamente na produção de suínos afligindo grande parte dos produtores principalmente em regiões distantes dos grandes centros ou das principais linhas de transmissão. Sobre essa questão recentemente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabeleceu uma regulamentação para geração distribuída e sistema de compensação, foi um importante incentivo para geração de energia elétrica a partir do biogás gerado dos resíduos da suinocultura.

### 3.3 A PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM RESÍDUOS DA SUINOCULTURA

A produção de biogás através de dejetos suínos é um processo amplamente utilizado (MATA-ALVAREZ et al., 2014). Embora o aproveitamento econômico dos dejetos suínos para a produção de biogás não seja uma prática nova, o processo de produção de biogás recebe interferência de condições ambientais no digestor, temperatura, pH, capacidade tampão e concentrações de ácidos graxos (WARD et al., 2008).

A DA de resíduos da suinocultura proporciona uma grande fonte de energia renovável e reciclagem de nutrientes, minimizando o impacto ambiental da gestão do estrume. No entanto a DA de resíduos da suinocultura apresenta diversos inconvenientes como o baixo teor de sólidos e a baixa relação C/N que leva a problemas de toxicidade no biodigestor (ANGELIDAKI et al., 2011).

A toxicidade no biodigestor pode ser causada por compostos como H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub>. O primeiro é gerado pela redução de sulfato o segundo formada pela fermentação de nitrogênio orgânico (ureia e proteínas). Devido à alta concentração de nitrogênio e geralmente valores de pH bastante elevados, a amônia é considerado o principal inibidor na DA de dejetos suínos (HANSEN et al., 1998).

A variação dos no rendimento de um mesmo substrato se deve aos diversos fatores e condições do processo (POSCHL, WARD E OWENDE, 2010). Existem divergências quanto à produção de metano relatada na literatura o que pode ser atribuído à origem do substrato e condições de operação do biodigestor. A tabela 4 apresenta uma relação do volume de biogás relatado na bibliografia por diferentes autores.

**Tabela 5 - Volume em L de metano /Kg SV**

<b>CH<sub>4</sub> L/Kg SV</b>	<b>Autor</b>
150 - 300	Oliveira (1993)
115 - 432	Chen <i>et al.</i> (2014)
200 - 300	Moller (2003)
180 - 200	Manser, Mihelcic, Ergas (2015)
100 - 300	Kinyua , Cunningham e Ergas (2014)

**Fonte: Autoria própria**

Contudo, a produção de biogás a partir dos resíduos da suinocultura pode ser melhorada em termos de rendimento, segundo Mata-Alvarez et al. (2014) a codigestão anaeróbica é a opção mais viável para superar os inconvenientes da monodigestão e aumentar a produção de biogás.

### 3.3.1 A Codigestão Anaeróbica dos Resíduos da Suinocultura

Os resíduos suínos quando codigeridos com outros resíduos proporcionam o ajuste da relação C/N, ajuste de micro e macro nutrientes necessários para os micro-organismos metanogênicos além de aumentar a capacidade de tamponamento (WEILAND, 2000).

Os resíduos suínos são preferencialmente codigeridos com resíduos que contenham elevado teor de carbono promovendo a melhora da relação C/N (MURTO et al., 2004 e WARD et al., 2008). A codigestão proporciona ainda diluição ou concentração do material para um teor de matéria seca adequado para a melhor degradação dos substratos (ANGELIDAKI e AHRING, 1997).

A literatura relata a codigestão de resíduos suínos com uma ampla variedade de resíduos como resíduos do processamento industrial (como restos da produção de biodiesel, azeite de oliva, batatas e beterraba), resíduos agrícolas (milho, arroz, trigo, capim), resíduos de cozinha, algas, lixo e lodo de esgoto.

Segundo Weiland (2006) a codigestão de estrume com outros resíduos orgânicos ou culturas energéticas como silagem de milho, silagem de capim e resíduos de cereais proporcionou maiores rendimentos de biogás. Braun et al. (2003) afirma que codigestão anaeróbica de resíduos pode aumentar a produção de biogás de 80 a 400% dependendo da taxa de adição e da composição do cosubstrato. Aumentar a produção de biogás através da codigestão anaeróbica é tornar o processo economicamente viável (WEILAND, 2006; MATA-ALVAREZ, 2014).

Para Wang et al. (2009) os resíduos agrícolas representam um grande potencial a ser explorado como matéria-prima para na codigestão com esterco animal para produção de biogás através da digestão anaeróbia. As atividades agrícolas produzem uma grande quantidade de resíduos que podem ser uma matéria prima valiosa para a produção de biogás (WU et al. 2010). A codigestão de

o estrume pode proporcionar capacidade de tamponamento e uma ampla variedade de nutrientes, enquanto o alto teor de carbono dos vegetais pode melhorar a relação C /N da matéria-prima, diminuindo assim o risco de inibição de amônia para o processo de digestão (HILLS E ROBERTS,1981; HASHIMOTO, 1983).

Contudo, a codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas pode ser uma alternativa para alavancar a produção de biogás ao mesmo tempo, que promove a redução do impacto ambiental com a destinação correta dos resíduos.

## 4 OS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

O capítulo aborda em sua primeira seção a caracterização dos resíduos agrícolas. A segunda seção aborda os resíduos agrícolas no Brasil e a terceira seção identifica os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Definem-se como resíduos agrícolas ou biomassa agrícola os materiais orgânicos subprodutos da colheita e do processamento de culturas agrícolas. Estes resíduos podem ser ainda categorizados em resíduos de campo e resíduos de processo (BHATTACHARYA et al. 2005).

Ainda segundo Bhattacharya et al. (2005) os resíduos de campos são subprodutos do momento da colheita (como exemplo palha de arroz e palha de trigo) enquanto que os resíduos de processo são coproduzidos durante o processamento das culturas (por exemplo, casca de arroz, bagaço de cana). A disponibilidade de resíduos de campo está sujeita, de algum modo, a utilizações concorrentes (por exemplo, forragem de animais, palha, etc.), enquanto que os resíduos de processo possuem baixa concorrência.

A viabilidade do uso de resíduos agrícolas que podem ser explorados deve ser cuidadosamente avaliada, uma porcentagem destes resíduos deve permanecer na área de plantio a fim de contribuir para a proteção dos solos entre os períodos de colheita e novo plantio, retendo a umidade do solo, protegendo a biota, evitando a erosão e restaurando os nutrientes que foram extraídos pela planta (EPE, 2017) Forster-Carneiro et al. (2013) enfatiza que o aproveitamento dos resíduos agrícolas como matéria prima deve levar em consideração os locais em que estão dispostos e arredores, bem como os sistemas de produção em uso, as características do solo e sua relação com a produtividade, tipos de tratamento, características climáticas e destinação final.

O teor de umidade e os requisitos agronômicos dos resíduos devem ser considerados identificando os resíduos que devem permanecer no solo. Por

exemplo, a cana-de-açúcar tem um teor máximo de umidade de 85%, indicando que 50% dos resíduos devem ser deixados no solo (FORSTER-CARNEIRO et al., 2013).

Consideradas as necessidades de regeneração do solo, a produção agrícola gera uma quantidade significativa de resíduos que podem ser utilizados para a produção de energia contribuindo para o desenvolvimento sustentável e para segurança energética. Segundo WBA (2017), os resíduos agrícolas são subutilizados a nível mundial e tem potencial para satisfazer as necessidades energéticas e reduzir o impacto ambiental.

Segundo Forster-Carneiro et al. (2013) resíduos, agrícolas e resíduos animais podem ser efetivamente transformados em energia em sistemas similares a uma refinaria de etanol, onde um processo integrado envolve a conversão de biomassa em combustível, energia e produtos químicos.

A evolução da pecuária e aumento dos rendimentos na produção agrícola resultam no aumento da produção de biomassa. Com isso aumentam as perspectivas para uma utilização integrada da biomassa através de uma abordagem em cascata ou através da criação de biorrefinarias, como resultado da competição entre usos tradicionais de biomassa (por exemplo, alimentos, rações e fibras), bioenergia, indústrias florestais tradicionais (por exemplo, painéis, celulose e papel) e setores em crescimento como biomateriais e química verde (SCARLAT et al., 2015).

Para Vardega, Prado e Meireles (2015), a utilização dos resíduos promove o fechamento de ciclos produtivos, onde os resíduos de uma indústria são matéria-prima para outros, Os resíduos agro-alimentares são fontes importantes de compostos com interesse comercial que poderiam ser recuperados tanto para diminuir o volume de resíduos gerados quanto para melhorar a viabilidade econômica dos processos, produzindo produtos de valor agregado.

Nayal, Mammdov e Ciliz (2016) exploraram os benefícios ambientais da produção de biogás a partir de uma mistura de resíduos agrícolas e animais através DA e seu uso para geração de eletricidade e calor, segundo os autores gerar energia a partir de resíduos agrícolas poderia proporcionar segurança energética para as áreas rurais e reduzir a pegada de carbono.

Para Alaviejev e Soheila (2016) as emissões de Gase de Efeito Estufa (GEE) podem ser significativamente reduzidas, os autores avaliaram a quantidade e os tipos de resíduo agrícolas produzidos no Irã. Seus resultados demonstram que

um total de 11,33 milhões de toneladas de biomassa agrícola podem ser utilizados para produção de diversos combustíveis, segundo os autores estes resíduos podem gerar 3,84 giga litros (GL) de bioetanol, 1,07 GL de biobutanol, 3,15 bilhões de m<sup>3</sup> de biogás e 0,90 de m<sup>3</sup> bio-hidrogênio.

A busca por uma alternativa aos combustíveis de primeira geração que concorrem com a produção de alimentos, vem dando ênfase aos resíduos agrícolas para a produção de bioenergia. Na união Europeia estima-se que metade da meta de energias renováveis para 2020 seja proveniente da biomassa agrícola (SCARLAT et al., 2015).

## 4.2 OS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Para Forster-Carneiro et al. (2013) o fato de o Brasil ser um dos maiores produtores de commodities agrícolas e animais representa um grande potencial para o uso dos resíduos em biorrefinarias para geração de bioenergia. Diante do exposto ressalta-se a possibilidade de aproveitamento dos resíduos de colheitas para a geração de energia. A biomassa agrícola tem baixo custo, é abundante e mais importante, não compete com a produção de alimentos, a produção de energia através de resíduos ainda reduz as emissões de gases de efeito estufa (SIMS et al., 2010).

O Brasil se destaca no cenário mundial como um dos maiores produtores de commodities agrícolas (FORSTER-CARNEIRO et al., 2013). O país apresenta um grande potencial de crescimento e reúne inúmeras vantagens comparativas que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas, agroindustriais e silviculturas, em particular aqueles dedicados a energia (EPE, 2007).

Ainda segundo EPE (2015) o país possui uma vasta área disponível para a agricultura dentro dos limites aceitos de impacto ambiental, capacidade de múltiplos cultivos ao longo de um único ano, a intensa radiação solar, diversidade de clima, biodiversidade e a existência de desenvolvimento científico e tecnológico agrícola específico da zona tropical, associado a uma agroindústria sólida e produtiva.

Todo este potencial agrícola está associado à geração de uma imensa quantidade de resíduos. Para Forster-Carneiro et al. (2013) o Brasil está perdendo a oportunidade de gerar negócios a partir da produção agrícola transformando seus resíduos em diferentes coprodutos e energia.

Dada a importância dos resíduos agrícolas para a geração de energia, o assunto é destaque no Plano nacional de energia (PNE) formulado pelo Ministério de Minas e Energia e elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é composto de uma série de estudos formulados com o objetivo fornecerem conhecimentos para a elaboração de políticas energéticas segundo uma visão integrada dos recursos disponíveis. O PNE 2030 estima a disponibilidade dos resíduos agrícolas das principais culturas do país, tenham ou não, alguma destinação energética estabelecida (EPE, 2007).

#### 4.3 OS PRINCIPAIS RESÍDUOS AGRÍCOLAS PRODUZIDOS NO BRASIL

Dentre as principais culturas agrícolas do Brasil se destacam a soja, o milho e o arroz respondendo por quase 90% da produção física e, aproximadamente, 80% da área utilizada para cultivo, entre as culturas temporárias a cana-de-açúcar é a que mais se destaca (EPE, 2007).

A primeira estimativa do IBGE (2017) indica a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas de 221,4 milhões de toneladas, 20,3% superior à obtida em 2016 (184,0 milhões de toneladas). A área a ser colhida é de 59,9 milhões de hectares, apresentando acréscimo de 4,9% frente à área colhida em 2016 (57,1 milhões de hectares). Os principais produtos deste grupo são o arroz, o milho e a soja, que, somados, representaram 93,5% da estimativa da produção e responderam por 87,4% da área a ser colhida. Em relação ao ano anterior, houve acréscimo de 1,9% na área da soja, de 10,3% na área do milho e de 1,2% na área de arroz. No que se refere à produção, houve acréscimos de 11,8% para a soja, de 10,0% para o arroz e de 38,9% para o milho.

O volume da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas mostra a seguinte distribuição: Centro-Oeste, 94,0 milhões de toneladas; Sul, 79,9 milhões de toneladas; Sudeste, 21,6 milhões de toneladas; Nordeste, 18,0 milhões de toneladas

e Norte, 7,8 milhões de toneladas. Comparativamente à safra anterior, foram constatados incrementos de 25,2% na Região Centro-Oeste, de 9,4% na Região Sul, de 10,0% na Região Sudeste, de 89,0% na Região Nordeste e de 16,0% na Região Norte. Nessa avaliação para 2017, o Mato Grosso liderou como maior produtor nacional de grãos, com uma participação de 24,6%, seguido pelo Paraná (18,3%) e Rio Grande do Sul (14,8%), que, somados, representaram 57,7 % do total nacional previsto (IBGE, 2017).

Tendo em vista o volume de produção, com isso a abundância de resíduos gerados delimitou-se para esta pesquisa os resíduos de soja, milho, arroz e cana de açúcar. A Tabela 5 demonstra a quantidade de biomassa produzida no Brasil e a previsão para os próximos anos.

**Tabela 6 - Oferta mássica de biomassa por resíduo agrícola no Brasil (10<sup>6</sup> t/ano)**

	2005	2010	2015	2020	2030
Soja	558	731	898	1058	1402
Milho	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Arroz (casca)	2	2	3	3	3
Cana de açúcar (palha)	60	73	100	119	160
Cana de açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Total	911	1186	1464	1722	2273

Fonte: EPE (2007)

#### 4.3.1 Resíduos de Soja

A soja é uma leguminosa rica em proteínas, lipídios (fração oleosa), fibras e sais minerais, como também das vitaminas do complexo B (EPE, 2007).

Segundo FAOSTAT (2016), cerca de 104 a 130 milhões de toneladas por ano de palha de soja são geradas apenas da produção brasileira. Os resíduos agrícolas da soja permanecem no campo e são tratados como palha, estes consistem em caules, folhas e vagens.

A composição da palha consiste em média de 35% de celulose, 21% de lignina insolúvel, 17% de hemiceluloses, 11% de cinzas, 1% de lignina solúvel. Trata-se de um material renovável e de baixo custo que pode ser considerado como matéria prima para a produção de produtos químicos com interesse econômico e

social, no entanto, este resíduo tem recebido pouca atenção como matéria-prima para geração de energia (CABRERA et al., 2015).

Para Abdulkhania et al. (2016) a palha de soja contém uma quantidade suficiente de celulose, hemiceluloses e lignina para a produção de uma variedade de biomateriais, biocombustíveis e bioquímicos.

O processamento da soja também gera uma quantidade significativa de resíduos celulósicos como palha, fibras, cascos e melaço, subprodutos do processo de produção de óleo e proteína da soja. Devido ao baixo custo e grande abundância desses materiais celulósicos derivados da soja são potenciais matéria-prima para produzir biocombustíveis e bioprodutos (KELBERT et al., 2015).

Abdulkhania et al. (2016) o óleo é o produto mais notável da soja pode ser utilizado para a produção de biodiesel. O resíduo remanescente após a produção de biodiesel e o caule da planta são uma matéria-prima potencial para processos termoquímicos e bioquímicos como digestão anaeróbica, fermentação, gaseificação, pirólise e liquefação.

#### 4.3.2 Resíduos de Milho

A geração de resíduos agrícolas derivados da cultura do milho que permanecem no campo podem ser divididos em sabugo, colmo, folha e palha que cobre a espiga (EPE, 2007).

A maioria dos resíduos do milho são resíduos deixados no campo. A retirada dos resíduos do campo pode resultar em erosão, reduzir a produtividade da cultura e esgotar o carbono e nutrientes do solo (GRAHAM et al., 2007). Para Forster-Carneiro et al. (2013) apesar da palha ser importante para a reestruturação do solo, a colheita mecanizada gera resíduos em demasia o que vem causando sérios problemas de pragas que proliferam em ambientes úmidos e protegidos.

Muitas tecnologias de extração de energia de resíduos lignocelulósicos tem sido relatadas na literatura, os resíduos lignocelulósicos, como os talos de milho são fontes potenciais de bioenergia devido às suas enormes quantidades e renovabilidade (KIM E HONG, 2001).

A natureza lignocelulósica do sabugo de milho exige que geralmente seja aplicado um tratamento físico-químico para quebrar o complexo lignocelulósico e

utilizar o resíduo para a produção de biocombustível (ZHENG et al., 2014). O retalho de milho é uma excelente matéria-prima A para geração de energia devido ao alto teor de celulose e hemicelulose, só é comparável ao do bagaço de cana-de-açúcar (VARDENGA, PRADO E MEIRELES, 2015).

Contudo, os resíduos de milho representam uma matéria-prima com potencial para a produção de bioenergia e produtos de base biológica que poderiam reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (GRAHAM et al., 2007).

#### 4.3.3 Resíduos de Arroz

Segundo FAO (2013), o arroz é a terceira colheita de grãos mais importante do mundo depois da cana-de-açúcar e do milho em termos de sua produção total. A palha de arroz permanece no campo após a colheita. Em relação aos resíduos do processamento do arroz, destacam-se a casca e o farelo.

A casca de arroz é formada por grande percentual de substâncias orgânicas, a exemplo da lignocelulose, formada por predominantemente celulose, hemiceluloses e lignina com algumas quantidades de proteínas, amido, extrativos e inorgânicos (RABEMANOLONTSOA et al., 2011). O farelo de arroz é um subproduto da refinação do arroz, composto por proteínas, carboidratos, fibras brutas e lipídios (CHEN et al. 2008).

Diante do exposto a alta porcentagem de substâncias orgânicas dos resíduos do arroz, assim como outras lignoceluloses, tornam este resíduo uma fonte potencial para geração de bioenergia.

#### 4.3.4 Resíduos de Cana-de-Açúcar

Os resíduos de cana de açúcar são derivados da colheita e do processamento da cana de açúcar.

A quantidade de resíduos gerados na colheita esta sujeita a fatores como o sistema com ou sem queima da cana pré-colheita, a altura dos ponteiros, a variedade da planta, a idade da cultura e seu estágio de corte, o clima, o solo, o uso ou não de vinhoto no campo, entre outros (EPE, 2007). Forster- Carneiro et al.

(2013) afirma que para cada 1000 kg de cana açúcar são gerados 220 kg de resíduos de produção.

Os resíduos pós-colheita, incluindo topos de cana-de-açúcar podem ser uma fonte abundante, barata e prontamente disponível de biomassa lenhocelulósica. Possuem ainda alto teor de sacarose e alta eficiência na acumulação de energia solar. Após a colheita de cana-de-açúcar, folhas, topos são deixados no campo enquanto o produto é transportado para engenhos de para a extração do suco de cana (BENJAMIN, CHENG, E GÖRGENS, 2013).

Segundo Sindhu et al. (2016), as Folhas e topos da cana de açúcar possuem a maior parte de sais e nutrientes, o caule apresenta 90% de sacarose e pequenas quantidades de glicose e frutose. A composição de açúcar varia conforme o teor de umidade que varia entre 13,5% nas folhas secas e 82,3% nos topos. O teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre apresenta valores semelhantes nas folhas secas e nos topos.

O principal resíduo do processamento da cana de açúcar é o bagaço, este consiste em um resíduo fibroso de caule deixado após o esmagamento e extração do suco da cana-de-açúcar. O bagaço contém 50% de celulose, 25% cada de hemicelulose e lignina. Comparando com outros resíduos agrícolas, o bagaço pode ser considerado como um rico reservatório de energia solar devido aos seus altos rendimentos e capacidade de regeneração anual (SINDHU et al. 2016).

Ainda segundo Sindhu et al. (2016) o processamento da cana de açúcar ainda gera melaço e a vinhaça. O primeiro consiste em um subproduto escuro, viscoso e rico em açúcar proveniente da extração de açúcar da planta e o segundo PE o subproduto da indústria de açúcar e etanol, com um pH ácido possui alto teor orgânico e odor desagradável. Em torno de 10 à 15 litros de vinhaça são gerados durante a produção de um litro de etanol.

Diante do exposto acredita-se que a produção de cana-de-açúcar gera uma quantidade significativa de resíduos que podem ser reaproveitados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil que podem ser codigeridos com resíduo da suinocultura e os rendimentos de biogás, benefícios e implicações da produção de biogás através da codigestão anaeróbica dos resíduos da suinocultura com os resíduos agrícolas.

Embora, haja muitos estudos sobre processo de codigestão anaeróbica, pouco tem sido relatado sobre a otimização da produção de biogás de resíduos suínos com resíduos da agricultura. O quadro 2 lista os países em que as pesquisas foram realizadas.

**Quadro 2 - Países que realizaram pesquisas de codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura e Agrícolas desde 2010**

<b>Autor e ano</b>	<b>Escala</b>	<b>País em que foi realizada</b>
Wang et al. (2017)	Laboratório	China
Zhang et al (2015)	Laboratório	China
Shievano et al. (2016)	Laboratório	Itália
Mussoline et al. (2014)	Fazenda	Itália
Li et al. (2015)	Laboratório	China
Mussoline et al. (2012)	Laboratório	Itália
Wu et al. (2010)	Laboratório	EUA

**Fonte: Autoria própria**

Não foram encontrados resultados para a codigestão anaeróbica de dejetos suínos com resíduos de soja e resíduos da cana de açúcar. O farelo de soja apresenta uma relação C/ N baixa para ser utilizada como o principal substrato fonte de carbono, no entanto ser utilizado como uma fonte de azoto produtivo para a fermentação ABDULKHANIA et al. (2016). A ausência de pesquisas com a codigestão destes dois substratos pode ser justificada devido ao esterco suíno possuir características semelhantes, entende-se que não são substratos que completam as deficiências um do outro.

Existem pesquisas sobre a produção de biogás através da codigestão de resíduos de soja com outros resíduos e da monodigestão de resíduos de cana de açúcar através de pré-tratamentos o que demonstra que estes resíduos também podem ser utilizados para a produção de biogás. No entanto não há relatos da codigestão de resíduos da suinocultura com estes resíduos.

Os substratos encontrados na codigestão de resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas foram o milho e arroz.

## 5.1 A CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS SUINOS E RESÍDUOS DE MILHO

Foram encontrados três estudos que relatam o processo de produção do biogás. Os experimentos conduzidos *por* Zhang et al. (2015) Wang et al. 2017 e Wu et al. (2010) constata a melhora do processo de produção de biogás através da codigestão anaeróbica.

Wu et al. (2010) Pesquisou a relação carbono nitrogênio na codigestão de talo de milho e resíduo suíno sob temperatura mesofílica, a pesquisa não relata o volume de biogás produzido por quantidade de substrato, não sendo possível a comparação com os outros trabalhos citados. A maior produção de metano foi identificada com a relação C/N de 20/1. O autor afirma que obteve uma produção de metano 11,4 vezes maior em relação à monodigestão de resíduos suínos.

Os estudos conduzidos por Zhang et al. (2015) e Wang et al. (2017) demonstram a proporção de substrato utilizado e a quantidade de litros de biogás gerado por Kg de substrato, permitindo comparação entre os mesmos.

Ambos os estudos foram conduzidos em laboratório utilizando como reator frascos Erlenmeyer. Estes estudos de codigestão foram realizados em experiências em lote e em garrafas, não havendo informações disponíveis sobre o efeito da taxa de carregamento do digestor (COV) sobre a estabilidade e o desempenho da codigestão.

Wang et al. (2017) relata que o caule de milho foi reduzido a partículas de 2mm . Como biodigestor, foi utilizada uma garrafa com cinco litros de volume, dos quais a mistura inserida para a codigestão foi de 3,4L, Sendo 1,6L de inóculo.O autor não relata o número de sólidos totais, os sólidos voláteis representaram 6% do volume.

Zhang et al. (2015) relata que o caule de milho foi reduzido a partículas de 1 mm . Como biodigestor foram utilizadas garrafas com um litro de volume, contendo 500g de mistura e 200g de inóculo. Os ST representaram 8% do volume, o autor não relata o número de sólidos voláteis.

O estudo realizado por Wang et al. (2017) teve como objetivo analisar os micro-organismos presentes no substrato. Enquanto Zhang et al. (2015) testou diferentes razões de dos substratos na codigestão sob diferentes valores de Ph na DA. Os dados e condições de operação são demonstrados na tabela 6.

**Tabela 7 - Produção de biogás e parâmetros operacionais da codigestão de resíduos suínos e resíduos de milho**

Tipo de resíduo	Razão	Biogás L/Kg SV	Metano L/Kg SV	Temp °c	Ph	TRH dias	Autor
Esterco suíno/ Caule de milho	70/30	-	256,57	35	6	40	Wang et al. (2017)
Esterco suíno/ Caule de milho	70/30	307,68	145,98	55	7	35	Zhang et al (2015)
Esterco suíno/ Caule de milho	30/70	84,58	25,51	55	7	35	Zhang et al (2015)
Esterco suíno/ Caule de milho	30/70	92,38	21,72	55	7,5	35	Zhang et al (2015)
Esterco suíno/ Caule de milho	50/50	215,01	109,87	55	7	35	Zhang et al (2015)

**Fonte: Autoria própria**

A proporção de 70% de estrume suíno e 30% de resíduos de milho foi a que obteve melhores resultados nas pesquisas tanto de Zhang et al. (2015) como de Wang et al. (2017).

O tratamento conduzido sobre temperatura mesofílica resultou em maior produção de metano. O resultado justificado pelos relatos na literatura de que existe limitações quanto a estabilidade na fermentação de matérias-primas com alto teor de nitrogênio, como os resíduos suínos, levando a acumulação de nitrogênio amoniacal, causando intoxicação pela amônia, podem inibir a DA sob temperatura termofílica (HANSEN et al., 1998 e SALMINEM et al. 2002).

Segundo Zhang et al. (2015) não houve inibição significativa de amoníaco na codigestão sob alta temperatura devido à adição do caule de milho, o que ajuda a aliviar a inibição da amônia.

Ainda segundo Zhang *et al.* (2015) houve mudanças na relação entre pH e AGV e alcalinidade conforme a proporção de resíduo suíno utilizada. Quanto maior a razão de resíduo suíno, maior a capacidade de tamponamento (equilíbrio entre Ph básico e ácido) do sistema de codigestão, mostrando maior produção total de biogás. Com isso a codigestão de estrume suíno com resíduos de milho ajuda a melhorar a capacidade de tamponamento do sistema.

Contudo, o rendimento de Biogás e a taxa de produção de metano foram superiores em todos os experimentos de codigestão de resíduos de milho e resíduos

da suinocultura comprovando que a codigestão destes resíduos pode otimizar a produção de metano e melhorar a estabilidade do sistema.

## 5.2 A CODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS SUÍNOS E RESÍDUOS DE ARROZ

Os resíduos da produção de arroz apresentados na literatura durante o período pesquisado são a palha de arroz (MUSSOLINE et al., 2012; MUSSOLINE et al., 2014; Li et al., 2015) e o farelo de arroz (SHIEVANO et al. 2016).

Todos os estudos apresentados com exceção de Mussoline et al. (2014), foram realizados em escala laboratorial. Os resíduos foram codigeridos em sistema molhado sob agitação continua nas pesquisas apresentadas por Shievano et al. (2016) e Li et al. (2015.) e no sistema seco por Mussoline et al. (2012) e Mussoline et al. (2014). Os rendimentos de metano e parâmetros operacionais da produção de biogás a partir da codigestão destes resíduos são apresentados na Tabela 8:

**Tabela 8 - Produção de biogás e parâmetros operacionais da codigestão de estrume suíno e resíduos de arroz**

Tipo de resíduo	Razão	Biogás L/Kg SV	Metano L/Kg SV	Temp. (°C)	pH	TRH (d)	Autor
Estrume suíno/Farelo de arroz	89/11	230,88	154	55	6-8	40	Shievano et al. (2016)
Águas residuais da suinocultura/Palha de arroz	1/ 2,15	-	181	35-40	6,6- 7,8	422	Mussoline et al. (2014)
Estrume suíno/ Palha de arroz	0/1	467,4	253,86	37	7	75	Li et al. (2015)
Estrume suíno/ Palha de arroz	½	355,21	268,1	37	7	75	Li et al. (2015)
Estrume suíno/ Palha de arroz	1/1	478,98	267,1	37	7	75	Li et al. (2015)
Estrume suíno/ Palha de arroz	2/1	447,65	241,23	37	7	75	Li et al. (2015)
Estrume suíno/Palha de arroz	1/0	447.65	178,03	37	7	75	Li et al. (2015)
Águas residuais da suinocultura/Palha de arroz	1/3	532	231	30-40	7- 8,1	189	Mussoline et al. (2012)
Águas residuais da suinocultura/Palha de arroz	1/1,2	33	12	ambiente	7- 8,1	189	Mussoline et al. (2012)

**Fonte: Autoria própria**

Segundo Shievano et al. (2014) o farelo de arroz é um produto secundário amplamente disponível de uma das culturas mais importantes do mundo. A codigestão de estrume animal com um substrato rico em hidratos de carbono como o farelo de arroz é necessário para produzir quantidades atraentes de biocombustível.

Ainda segundo Shievano et al. (2014) a produção de biometano e hidrogênio pode ser explorada no sistema de uma biorrefinaria, os autores propõe diversificar os produtos obtidos a partir de resíduos agrícolas e promover uma economia circular. Desta forma, eliminam-se os resíduos ao mesmo tempo em que reduz os custos de produção do biogás através da diversificação produtos provenientes da digestão anaeróbia.

A maioria dos estudos explorou a palha de arroz na codigestão com resíduos suínos o que se deve a sinergia entre os substratos. A palha de arroz possui um baixo teor de azoto, o que resulta em relações C/ N relativamente elevadas. Assim a adição de resíduos suínos que possuem elevado teor de azoto e vestígios de elementos como Fe, Ni, Co e Mo promovem o equilíbrio de nutrientes nos digestores e podem melhorar a digestão anaeróbia de diferentes substratos (MUSSOLINE et al. 2012).

A codigestão de estrume suíno com a palha de arroz apresenta-se como uma maneira mais viável de melhorar a produção de biogás do que a aplicação de pré-tratamento a palha de arroz para melhorar a digestão (MUSSOLINE et al. 2014).

A palha de arroz é resistente à digestão anaeróbica, devido a lignina que a compõe e atua como um escudo limitando a fase da hidrólise (FERNANDES et al., 2009), as estratégias de pré tratamento são eficazes, porém a viabilidade da aplicação de em escala agrícola apresenta restrições, como aumento de insumos de energia, excesso de químicos e de água e questões de eliminação de resíduos associadas ao digestato (MUSSOLINE et al. 2014).

Sendo assim o estrume suíno adicionado à palha de arroz proporciona o equilíbrio de macro e micro nutrientes, capacidade de tamponamento e diversificação dos micro-organismos responsáveis pela DA (MUSSOLINE et al. 2012). Para Li et al. (2015) a codigestão é o método mais rentável para a regulação nutricional em comparação com a adição de reagentes químicos como os que contém azoto, tais como ureia ou bicarbonato de amônio.

Li et al. (2015) explorou diferentes proporções de matéria prima e COV para a codigestão de estrume suíno e palha de arroz. Os ensaios foram realizados em garrafas *erlenmeyer* de 2,5 L SV, os melhores resultados, segundo o autor para a exploração comercial. Estes foram realizados sob a COV de 6 e 8 kg SV ao dia. A produção de biogás foi de 400L/kg SV (50% CH<sub>4</sub>) e 450 (55% CH<sub>4</sub>) respectivamente.

Ainda segundo Li et al. (2015) a matéria prima e a COV são fatores responsáveis pela formação de espuma no reator, quando a COV foi de 12 Kg SV ao dia houve formação grave de espuma e a produção de metano foi severamente inibida pelo acúmulo de AGV. Segundo o autor para evitar a formação de espuma na DA, o reforço da mistura e design ótimo do digestor deve ser considerado nas aplicações de engenharia.

Diante do exposto ressalta-se que a COV afeta o desempenho da codigestão em termos de produção de biogás e a taxa de produção de metano. Explorar a maior COV aumenta a capacidade de aproveitamento da planta e elimina maior número de resíduos, reduzindo assim os custos de investimento, no entanto a COV excessiva pode causar falha no processo.

Segundo Mussoline et al. (2014) a codigestão molhada (ST<10%) conduzidas em pequena escala (garrafas de 2,5L) tendem a aumentar a homogeneidade e produzir rendimentos mais eficientes, porém, não podem ser aplicados em escala agrícola. Uma vez que o esterco de suíno é produzido diariamente, podendo ser aplicado no início da digestão também reaplicado frequentemente à palha para melhorar a estabilidade e aumentar a produção de metano

No que diz respeito a codigestão a seco utilizada nos relatos de Mussoline et al. (2012) e Mussoline et al. (2014) afirmam que com o mínimo de volume de água residual necessária é possível reduzir os custos de transporte e evitar problemas com a eliminação. A ideia central é carregar o biodigestor com palha de arroz uma vez por ano durante a época de colheita e digerir completamente todo o resíduo em um ano, para que os resíduos sejam eliminados antes da próxima colheita anual.

No ensaio de laboratório conduzido por Mussoline et al. (2012) foi testado o efeito da proporção dos resíduos e da temperatura na codigestão. A baixa produção de metano relatada no estudo sob temperatura ambiente na codigestão de águas residuais da suinocultura e palha de arroz na proporção 1/1,2 respectivamente evidenciou a falta de atividade metanogênica.

Os autores atribuem a ineficiência da codigestão à temperatura e principalmente ao baixo volume de águas residuais de suínos, insuficiente para estabelecer uma comunidade microbiana estável como uma fonte adequada de capacidade tampão e nitrogênio amoniacal para estabilizar a digestão anaeróbia de palha de arroz proporcionando um equilíbrio adequado de nutrientes.

Em uma operação em escala agrícola conduzida por Mussoline et al., (2014) a palha de arroz foi colhida de uma fazenda de arroz de 365 hectares (902 acres) no norte da Itália. O biodigestor utilizado é composto por duas células verticais anaeróbias com uma capacidade total de armazenamento de aproximadamente 13.000 m<sup>3</sup>, o que equivale a aproximadamente 1825 toneladas de palha de arroz. O reator apresenta ainda um sistema de recirculação do lixiviado disperso nas zonas da célula digestora para manter os níveis de umidade, homogeneizar a mistura para ajudar a equilibrar os micróbios e nutrientes e servir como uma conduta para a transferência de energia térmica (MUSSOLINE et al. 2014).

As duas células do biodigestor foram carregadas com palha de arroz após a colheita, a célula a primeira com 3050 fardos de palha (1098 toneladas) de palha e a segunda célula com 2020 palhas (727 toneladas). A concentração de ST foi de 84,3% durante o carregamento inicial e de 46% após adição das águas residuais. O biodigestor foi inicialmente inoculado com um total de 285 toneladas (4,9% TS) de efluentes de suíno, e aproximadamente 1300 toneladas de água foram adicionadas ao longo do tempo durante o primeiro ano (MUSSOLINE et al. 2014).

Ainda segundo Mussoline et al. (2014) não foi adicionado outro inóculo ao tratamento além do estrume, somente as águas residuais da suinocultura, com isso o período de aclimação dos micro-organismos foi de 200 dias a partir dos quais houve o aumento da circulação de lixiviados e com isso aumento da produção de biogás. Embora tenha havido tamponamento suficiente e equilíbrio de macro e micro nutrientes os autores recomendam uma razão de palha e águas residuais de 1/ 1,4 para melhorar a produção de gás e diminuir a período de aclimação.

As principais limitações num processo de codigestão em escala agrícola desta magnitude foram a dificuldade de prever a proporção apropriada de palha para as águas residuais da suinocultura devido a falta de homogeneidade da mistura no reator, dificuldades associadas a circulação de lixiviados ideal e a proporção de palha para o estrume (2,15/ 1) foi elevada e o período de aclimação foi muito extenso (MUSSOLINE et al. 2014).

Em um estudo em escala de laboratório sob temperatura mesofílica a razão de 1/3 de palha de arroz e águas residuais de suínos apresentou um período de aclimatação dos micro-organismos de 30 dias (MUSSOLINE et al. 2012). Por conseguinte a mesma razão utilizada em grande escala poderia reduzir o período de aclimatação para pelo menos de 60 dias, a redução do período de aclimatação adicionada a melhora da a recirculação de lixiviados e um sistema de troca de calor mais eficiente para manter condições mesofílicas durante todo o ano tornariam a codigestão destes resíduos mais eficiente. (MUSSOLINE et al. 2014).

Contudo a implantação de uma usina de biogás em escala agrícola, utilizando palha de arroz codigerida com resíduos da suinocultura oferece uma alternativa sustentável para a gestão da destinação de resíduos agrícolas e reduz uma parcela significativa das emissões de metano ao meio ambiente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o potencial de ampliação da produção de biogás dos resíduos da suinocultura por meio da codigestão com os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil.

Para que este objetivo pudesse ser alcançado, foi necessário responder aos objetivos específicos traçados na introdução deste trabalho.

Para a realização de cada objetivo específico, foi construído um Portfólio Bibliográfico e adotadas técnicas de revisões sistemáticas de literatura, para assegurar que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa fossem capturados.

Com base no Portfólio Bibliográfico levantado, foi realizado um estudo sobre do processo de produção de biogás em resposta ao objetivo específico descrever o escrever o processo de produção do biogás. Este objetivo foi singular para os objetivos seguintes visto que elucidou os fatores do processo que influenciam a quantidade de biogás a ser produzida.

Através de publicações de órgãos governamentais como EPE e IBGE foi realizado o segundo objetivo de identificar os principais resíduos agrícolas produzidos no Brasil, estes são a soja, milho, arroz e cana de açúcar.

Identificados os principais resíduos produzidos no Brasil, foi construído um portfólio bibliográfico sobre a codigestão anaeróbica destes resíduos com os resíduos da suinocultura. Os resultados demonstram que poucos artigos abordam o tema codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas, identificou-se que os resíduos agrícolas que podem ser codigeridos com os resíduos da suinocultura são os resíduos de arroz e milho; desta forma foi respondido o terceiro objetivo deste trabalho.

O quarto objetivo consistiu em analisar a proporção dos resíduos de arroz e de milho que geraram a maior quantidade de biogás. Esse quarto objetivo contribuiu para a escolha das condições operacionais em que houve maior produção a partir da DA destes resíduos, desta forma respondendo ao quarto objetivo deste trabalho.

A produção de metano através da DA de resíduos da suinocultura pode ser ampliada através da codigestão com resíduos agrícolas (resíduos de arroz e de milho). A codigestão anaeróbica destes resíduos proporciona o equilíbrio de macro e

micro nutrientes, capacidade de tamponamento e diversificação dos micro-organismos responsáveis pela DA, tornando o processo mais eficaz.

No que diz respeito à codigestão anaeróbica dos resíduos da suinocultura com os resíduos de milho a literatura relata a codigestão com caule de milho como substrato. A proporção que gerou maior produção de biogás foi 7/3 estrume suíno/caule de milho. O caule de milho foi reduzido a partículas de 2 mm para ser utilizado na codigestão. A mistura codigerida apresentou 6% do volume de sólidos voláteis. A operação foi realizada sob temperatura mesofílica, 35°C, COM Ph 6 e 40 dias de TRH, resultando em 256,57 L de metano por KG/ SV adicionados.

Na codigestão anaeróbica de resíduos suínos com resíduos de arroz os resíduos utilizados foram estrume suíno e farelo de arroz, estrume suíno e palha de arroz e águas residuais da suinocultura e palha de arroz.

A codigestão de estrume suíno com farelo de arroz resultou em 230 L/Kg SV de biogás, contendo 154 L/Kg SV de metano. A operação foi realizada sob temperatura termofílica, 55 °C, com Ph entre 6-8, com 40 dias de TRH.

A codigestão de estrume suíno com palha de arroz resultou em 478,98 L/Kg VS de biogás, contendo 267,1 L/Kg SV de metano. A operação foi realizada sob temperatura termofílica, 37°C, com Ph 7, com 75 dias de TRH.

A codigestão águas residuais da suinocultura com palha de arroz resultou em 532 L/Kg SV de biogás, contendo 231L/Kg SV de metano. A operação foi realizada sob temperatura termofílica, 30°C e 40°C, com Ph entre 7 e 8,1 com 189 dias de TRH.

Com o alcance dos resultados para cada objetivo específico traçado, reunindo todas as informações apresentadas neste trabalho, pôde-se chegar na proporção e condições operacionais que geraram a maior quantidade de biogás. Assim, essa pesquisa auxilia a acadêmicos, pesquisadores e gestores na área, na compreensão do processo como um todo e na tomada de decisão sustentável nas várias áreas da Engenharia de Produção.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento deste estudo foram identificadas algumas oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao tema deste trabalho. São elas:

- Avaliar o custo de retirada dos resíduos agrícolas do campo para a produção de biogás
- Avaliar a viabilidade econômica da produção de biogás através da codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas.
- Criar um modelo de codigestão anaeróbica de resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas.
- Fazer a avaliação do ciclo de vida da produção de biogás através da codigestão dos resíduos da suinocultura com resíduos agrícolas.

## REFERÊNCIAS

ABALDE, A. R.; FLOTASTS, X.; FERNÁNDEZ, B. OPTIMIZATION of the anaerobic co-digestion of pasteurized slaughterhouse waste, pig slurry and glycerine, **Waste Management**, v. 61 , mar, p. 521-528, 2017.

ABDULKHANI, A.; et al. Potential of Soya as a raw material for a whole crop biorefinery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.75 , ago, p.1269-1280 2017.

ABOUELENIEN, F.; NAKASHIMADA, Y.; NISHIO N. Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 107, p. 293-295, 2009.

ABPA (Associação Brasileira de Proteína Animal) Disponível em: <<http://abpa-br.com.br/noticia/contato/todas/exportacoes-de-carne-suina-crescem-307-em-agosto-1834>> Acesso em: 01 mar. 2017.

ALAVIJEH, K. M.; YAGHMAEI, S. Biochemical production of bioenergy from agricultural crops and residue in Iran. **Waste Management**, volume 52, Jun, pp 375-394, 2016.

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, 2006.

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.; AHRING, B.K.; Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. **Biodegradation**, 8 p. 221-226, 1997.

ANGELIDAKI, L.; ELLEGAARD, L. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 109 p. 95-105, 2003.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CRIADORES DE SUÍNOS (ABCS). **Produção de suínos: Teoria e prática /** Coordenação editorial Associação Brasileira de Criadores de Suínos; Coordenação Técnica da Integrall Soluções em Produção Animal. Brasília, DF, 2014. P. 908. Disponível em: <[http://www.abcs.org.br/attachments/1823\\_Livro%20Produ%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.abcs.org.br/attachments/1823_Livro%20Produ%C3%A7%C3%A3o.pdf)>. Acesso em: 09 fev. 2017.

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.

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.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) **Plano Nacional de Energia 2030 /** Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília, 12 v.: 01, 2007.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) **Plano Nacional de Energia 2050 /** Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília, 2015. 12 v.:02, 2015.

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

BHATTACHARYA, S. C.; et al. An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010. **Biomass and Bioenergy**, 29, p.153-166, 2005.

BAYR, S.; et al. Effect of additives on process stability of mesophilic anaerobic monodigestion of pig slaughterhouse waste. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 106- 113, 2012.

BENJAMIN, Y.; CHENG, H.; GÖRGENS, J.F. Evaluation of bagasse from different varieties of sugarcane by dilute acid pretreatment and enzymatic hydrolysis **Industrial Crops and Products**., 51, p. 7-18, 2013.

BOROWSKI S.; DOMAŃSKI J.; WEATHERLEY L. Anaerobic co-digestion of swine and poultry manure with municipal sewage sludge. **Waste Management**, v.34, n° 2 p. 513-21, 2014.

BOUGRIER, C.; DELGENES, J.P.; CARRERE, H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. **Chemical Engineering Journal** v.139, n° 2, p. 236-244, 2008.

BOURSIER, H.; BÉLINE, F; PAUL, E. Piggery wastewater characterisation for biological nitrogen removal process design. *Bioresource. Technolgy*. 96 p. 351-358, 2005).

BOUŠKOVÁ, A.; et al. Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge. **Water Research**, v.39. p. 1481-1488, 2005.

BRAUN, R.; BRACHTL, E.; GRASMUG, M. Codigestion of proteinaceous industrial **Biotechnology and Applied Biochemistry**. 109, p.139-153, 2003.

CABRERA, E.; et al. Comparison of industrially viable pretreatments to enhance soybean straw biodegradability. **Bioresource Technology**, 194 p. 1-6, 2015.

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.

CHEN, C. R.; et al. Supercritical carbon dioxide extraction and deacidification of rice bran oil. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 45, Issue 3, Jul. p. 322-331, 2008.

CHEN, Y.; ET AL. ASSESSMENT OF THE AVAILABILITY OF HOUSEHOLD BIOGAS RESOURCES IN RURAL CHINA INTERNATIONAL. **JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT**, V.1, N° 5, 2010.

CHEN, C.; et al. Continuous dry fermentation of swine manure for biogas production. **Waste Management**, vol. 38, Abr. p. 436-442, 2015.

CHO, J. K.; PARK, S. C.; CHANG H. N. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. **Bioresource Technology** v. 52, n°3, p.245-253, 1995.

COMINO, A. E.; ROSSO, M.; RIGGIO, V. Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. **Bioresource Technology** v. 101, n° 9, p 3013-3019, 2010.

CREAMER, K. S.; et al. Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure **Bioresource Technology**, v. 101 p. 3020-3024, 2010.

DENG, L.; et al. Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation **Applied Energy**, 114 p. 504-511, 2014.

DIVYA, D.; GOPINATH, L.R.; CHRISTY, M.P. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 690-699, 2015.

DONG, L.; YUAN, Z.; SUN Y. Semi-dry mesophilic anaerobic digestion of water sorted organic fraction of municipal solid waste (WS-OFMSW) **Bioresource Technology**, 101, p. 2722-2728, 2010.

FAO **Food and Agricultural Commodities Production**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> Acesso em: 01.02.16.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of United Nations (2016). **Production, Crops, Soybeans**. <Available online <http://faostat.fao.org/>> Acesso em 10.08.16.

FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE (FATMA). **Instrução Normativa, nº 11.** Suinocultura. Recomendações técnicas para aplicação fertilizantes orgânicos de suínos e monitoramento da qualidade do solo adubado. Florianópolis, 2014.

Disponível

em:<[http://www.sideropolis.sc.gov.br/uploads/273/arquivos/654746\\_in\\_11\\_Suinocultura.pdf](http://www.sideropolis.sc.gov.br/uploads/273/arquivos/654746_in_11_Suinocultura.pdf)> Acesso em: 18 fev. 2017.

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.

FORSTER-CARNEIRO, T.; et al. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, Ago, p. 78-88, 2013.

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 p. 6549-6557, 2008.

GRAHAM, R. L.; et al. Estoques de milho atuais e potenciais nos EUA. **Agronomy Journal**, 99 p.1-11, 2007.

GUENDOZ, A.; et al. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. **Bioresource Technology**, v.111, p.55-61, 2012.

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

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

HASHIMOTO A. G. Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and thermophilic temperatures. **Biotechnology and Bioengineering**, 25, pp. 185-200, 1983.

HILLS, D.J. ; ROBERTS D. W. Anaerobic-digestion of dairy manure and field crop residues **Agricultural Wastes**,v.3 p.179-189. 1981.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e estatística) **Estatística da Produção Agrícola**. Disponível em:

<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/estProdAgr\\_201601.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_201601.pdf)>. Acesso em: 28 fev. 2017.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e estatística). Disponível em:

<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/estProdAgr\\_201701.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_201701.pdf)> Acesso em: 26 jun. 2017.

ITO, M.; GUIMARÃES, D. D.; AMARAL, G. F. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 44, p.125 -156, 2016.

IZUMI, K.; et al. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste, **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 64, nº 7, p. 601-608, 2010.

JABEEN, M.; et al. High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 102, p.149-153, CESE-2014 Challenges in Environmental Science and Engineering Series Conference, 2015.

JIANG,J.; et al. Volatile fatty acids production from food waste: effects of pH, temperature, and organic loading rate. **Bioresource Technology**, v.143 p. 525-530, 2013.

KELBERT, M.; et al. Lignocellulosic bioethanol production with revalorization of low-cost agroindustrial by-products as nutritional supplements, **Industrial Crops and Products** 64, p. 16-24, 2015.

KIM, D.H.; et al. Combined (alkaline + ultrasonic) pretreatment effect on sewage sludge disintegration **Water Research**, v. 44, p. 3093-3100, 2010.

KIM, K. H.; HONG, J. Supercritical CO<sub>2</sub> pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic cellulose hydrolysis. **Bioresource technology**., 77, pp. 139-144, 2001.

KUNS, A.; MIELE A.; STEINMETZ, R. L. R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil. **Bioresource Technology**, v.100, Issue 22, nov, p. 5485-5489, 2009.

KOMEMOTO, K.; et al. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. **Waste Management**, v. 29, p.2950-2955, 2009.

LAHAV, O.; MORGAN, B.E. Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries a review. **Journal of chemical technology and biotechnology** v.79, nº12, p. 1331-1341, 2004.

LI, H.; et al. Optimized alkaline pretreatment of sludge before anaerobic digestion. **BioresourceTechnology**, v.123 p. 189-194, 2012.

LI, D.; et al. Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure. **Bioresource Technology**, v.187, Jul, p. 120-127, 2015.

MAGALHÃES, G. **Introdução à metodologia da pesquisa: caminhos da ciência e tecnologia**. São Paulo: Ática, 2005.

MAO, C.; et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

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.

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.

MIELE, M.; **Contratos, especializações, escala de produção e potencial poluidor na suinocultura de Santa Catarina**. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócios. Porto Alegre: 2006.

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.

MUSSOLINE, M.; et al. Design considerations for a farm-scale biogas plant based on pilot-scale anaerobic digesters loaded with rice straw and piggery wastewater. **Biomass Bioenergy**, 46, p.469, 2012.

NAH, I. W.; et al. Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process. **Water Research**, v. 34 n° 8 p. 2362-2368, 2000.

NAYAL, F.S.; MAMMADOV, A.; CILIZ, N. Environmental assessment of energy generation from agricultural and farm waste through anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management** v. 184, p. 389-399, 2016.

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.

NIELSEN, H. B.; UELLEND AHL, H.; AHRING, B.K. Regulation and optimization of the biogas process: propionate as a key parameter. **Biomass Bioenergy**, v.31 p. 820-830, 2007.

NIELSEN, H. B.; ANGELIDAKI, I.; Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. *Bioresource Technology*, v. 99 p. 7995-8001, 2008.

NIZAMI, A. S.; MURPHI, J.D. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v.14, n° 6, 2010.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos suínos**. Concórdia: EMBRAPA, 188p.1993.

PANICHNUMSIN, P.; et al. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. **Biomass Bioenergy**, v.34, p.1117-1124, 2010.

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

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.

RABEMANOLONTSOA, H.; AYADA, S.; SAKA, S.; Quantitative method applicable for various biomass species to determine their chemical composition **Biomass Bioenergy**, v.35 p. 4630-4635, 2011.

SAFLEY L.M. J.; WESTERMAN, P.W. Performance of a low temperature lagoon digester. **Bioresource Technology**, v. 41 n° 2 p. 167-175, 1992.

SAHINKAYA, S.; SEVIMLI, M. F. Synergistic effects of sono-alkaline pretreatment on anaerobic biodegradability of waste activated sludge. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** v. 19 n°1, p.197-206, 2013.

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

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná** - Curitiba: Senai/PR. 2016.

SCHIEVANO, A.; et al. Two-stage vs single-stage thermophilic anaerobic digestion: Comparison of energy production and biodegradation efficiencies. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n° 15, 7 p. 8502-8510, 2012.

SCARLAT, N.; et al. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. **Environmental Development**, v. 15, Jul. p. 3-34, 2015.

SIMS, R.E. et al. Review an overview of second generation biofuel Technologies, **Bioresource Technology**, v. 101, Issue 6, Mar., p. 1570-1580, 2010.

SINDHU, R.; et al. Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products - An overview. **Renewable Energy**, v. 98, Dez., p. 203-215 Special Issue: New Horizons in Biofuels Production and Technologies, 2016.

XU, J.; ADAIR, W.C; DESHUSSES, M. A. Performance evaluation of a full-scale innovative swine waste-to-energy system. **Bioresource Technology** v. 216, Set, p. 494-502, 2016.

WANG, K.; et al. Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: effect of pH. **Bioresource Technology**., v.161 p. 395-401, 2014.

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. **Bioresource. Technolgy** 120 p. 78-83, 2012.

WANG, H.; et al. Microbial community structure in anaerobic co-digestion of grass silage and cow manure in a laboratory continuously stirred tank reactor. **Biodegradation**, v. 21 p.135-146, 2010.

WANG, M.; et al. The dynamic changes and interactional networks of prokaryotic community between co-digestion and mono-digestions of corn stalk and pig manure. **Bioresource Technology**, v. 225, Feb, p. 23-33, 2017.

WARD, A. J.; t al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 7928-7940, 2008.

WARTELL, B. A.; et al. Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. **Bioresource Technology** v. 112 p. 42-50, 2012.

WBA (World Bioenergy Association) **WBA Global Bioenergy Statistics 2016**. Disponível em <<http://www.worldbioenergy.org/node/1027>> Acesso em: 12/02/2017

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

WEILAND, P. Biomass digestion in agriculture: a successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. **Engineering in Life Sciences** v.6, p. 302-309, 2006.

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

WU, C.; et al.; Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. **Bioresource Technology** , v. 101 pp. 4042-4047, 2010.

VARDANEGA, R.; PRADO, J. M.; MEIRELES, M. A. A. Adding value to agri-food residues by means of supercritical technology. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 96, Jan. p. 217-227, 2015.

YANG, L.; et al. Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment, **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 105, p.153-159, 2015.

YAN, Y.; et al. Ultrasonic enhancement of waste activated sludge hydrolysis and volatile fatty acids accumulation at pH 10.0 **Water Research** v. 44 p. 3329-3336, 2010.

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, n° 16, p. 9571-9580, 2011.

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, D.; et al. New sludge pretreatment method to improve methane production in waste activated sludge digestion. **Environmental Science e Technology**, v. 44, p. 4802-4808, 2010.

ZHANG, T.; et al. Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues **PLoS One**, v. 8 p. 66845, 2013.

ZHANG, Y.; et al. Robustness of archaeal populations in anaerobic co-digestion of dairy and poultry wastes. **Bioresource Technology** , v.102, p. 779-785, 2011.

ZHANG, T.; et al. Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk. **Waste Management**, v. 35, Jan, p.119-126, 2015.

ZHEN, G.; et al. Combined electrical-alkali pretreatment to increase the anaerobic hydrolysis rate of waste activated sludge during anaerobic digestion. **Applied Energy**, v.128, p. 93-102, 2014.

ZHENG, Y.; et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in Energy and Combustion Science** 42, p. 35-53, 2014.

ZIGANSHIN, A.M.; et al. Microbial community structure and dynamics during anaerobic digestion of various agricultural waste materials. **Bioenergy and Biofuels Applied Microbiology and Biotechnology**, v.97, p.5161-5174, 2013.