

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

HEDER JOBBINS DE ARRUDA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE VEGETAIS**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2020

HEDER JOBBINS DE ARRUDA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO DO
PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE VEGETAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia, do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Alessandra Cristine Novak Sydney
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney

PONTA GROSSA

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.21/20

A779 Arruda, Heder Jobbins de

Avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás a partir de resíduo do processamento industrial de vegetais. / Heder Jobbins de Arruda, 2020.
67 f.; il. 30 cm.

Orientadora: Alessandra Cristine Novak Sydney
Coorientador: Eduardo Bittencourt Sydney

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

1. Biogás. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Digestão anaeróbia. 4. Resíduos industriais. 5. Estudos de viabilidade. I. Sydney, Alessandra Cristine Novak. II. Sydney, Eduardo Bittencourt. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 606.6



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia

PPGBIOTEC
Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº **14/2020**

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUO DO PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE VEGETAIS

por

Heder Jobbins de Arruda

Esta dissertação foi apresentada às **09 horas e 30 minutos** de **21 de fevereiro de 2020**, na sala da DIRPPG, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM BIOTECNOLOGIA, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Profª Drª Ana Cláudia Barana
(UEPG)

Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga (UEPG)

Profª. Drª. Alessandra Cristine Novak Sydney (UTFPR)
Orientadora e presidente da banca



Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney (UTFPR)
Coordenador Adjunto do PPGBIOTEC
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na secretaria do Programa -

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus porque Dele, por Ele e pra Ele são todas as coisas.

A minha família, pelo amor, incentivo e apoio nos momentos mais difíceis, em especial aos pais Airton e Raquel, ao Elisson e Elisama e também a querida Raquel Cristina. Aos tios, primos avós e amigos que me apoiaram durante a caminhada.

Aos meus orientadores, professores Alessandra e Eduardo Bittencourt, por todo o apoio e por acreditar e confiar em mim durante o período de realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do PPGBIOTEC, pelo apoio, amizade e auxílio durante o período que pudemos conviver, especialmente ao Laboratório de Fermentações.

A toda a comunidade da UTFPR, seu corpo docente, direção e administração por todo conhecimento disponibilizado a mim em toda esta trajetória, desde o curso técnico até ao presente momento.

A Vapza Alimentos, por confiar em mim a realização deste trabalho e apoio material e financeiro.

Ao CIBIOGÁS-ER pela oportunidade de realização de estágio e realização de parte da pesquisa no Laboratório de Biogás e aos profissionais que me auxiliaram nas atividades desenvolvidas e me ensinaram muito sobre o universo do biogás.

Aos amigos e professores do Departamento de Engenharia Civil da UEPG, onde convivi e recebi apoio durante o período de realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação, muito obrigado!

RESUMO

Arruda, Heder Jobbins de. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás a partir de resíduo do processamento industrial de vegetais**. 67 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

A substituição de fontes de energias fósseis por energias renováveis é uma preocupação constante. A demanda por produtos prontos para o consumo ou de preparo rápido tem aumentado e as empresas que atuam neste ramo tem se deparado com o aumento no consumo de energia e da geração de passivo ambiental. A industrialização de vegetais gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos como casca, polpa, partes não comestíveis da planta e água residuária do processo. Assim, se faz necessária a destinação adequada desses resíduos, enquadrando-se na legislação vigente e reduzindo o impacto ao meio ambiente. A biodigestão ou digestão anaeróbia é um processo que além de estabilizar compostos orgânicos gera o biogás, gás combustível composto basicamente por CH_4 e CO_2 , e uma nova biomassa, material líquido/sólido que pode ser utilizada como biofertilizante. O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia do resíduo de processamento de vegetais de uma indústria no estado do Paraná, visando a produção de energia e a destinação adequada dos resíduos sólidos. Para atender ao objetivo, foram identificados os resíduos com potencial teórico de conversão a metano, realizou-se análises físico-químicas para caracterizar aspectos importantes na biodigestão, verificou-se o máximo potencial bioquímico de metano do resíduo aplicando a metodologia VDI 4630 e estimou-se o retorno financeiro que pode ser obtido com a produção energia. Foi possível constatar um potencial teórico semelhante entre os resíduos vegetais, e assim, a sazonalidade da produção não afetaria significativamente o desempenho do biodigestor. Selecionou-se o resíduo do processamento de batatas inglesas, por representar quase a totalidade do resíduo gerado pela empresa, e este apresentou uma relação C:N de 42,04, um teor de SVT de 8,68% e pH de 7,33. No ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás, obteve-se uma produção acumulada de 615 L/kg_{SVT} em 31 dias, sendo que no décimo quinto dia atingiu-se 600 L/kg_{SVT}, com uma média de 50,89% de metano. O melhor aproveitamento deste volume de biogás observado é em substituição aos combustíveis GNV e GLP consumidos pela própria unidade industrial. Subprodutos como o gás carbônico e o biofertilizante, ou mesmo o próprio biogás, poderão ser negociados em parcerias com produtores da região.

Palavras-chave: Biodigestão. Biogás. Energia renovável. Processamento Industrial.

ABSTRACT

Arruda, Heder Jobbins de. **Evaluation of the technical and economic viability of biogas production from waste from industrial vegetable**. 67 p. Thesis (Master's Degree in Biotechnology) - Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2020.

The replacement of fossil energy sources by renewable energy is a constant concern. The demand for ready-to-eat or fast-prepared products has increased and companies operating in this field have faced an increase in energy consumption and the generation of environmental liabilities. The industrialization of vegetables generates a large amount of organic waste such as peel, pulp, inedible parts of the plant and wastewater from the process. Thus, it is necessary to properly dispose of these residues, in accordance with current legislation and reducing the impact on the environment. Biodigestion or anaerobic digestion is a process that in addition to stabilizing organic compounds generates biogas, a fuel gas basically composed of CH₄ and CO₂, and a new biomass, liquid/solid material that can be used as a biofertilizer. The objective of this work is to verify the technical and economic feasibility of anaerobic digestion of vegetable processing waste from an industry in the state of Paraná aiming at energy production with biogas and the proper disposal of solid waste. To meet the objective, the residues with the theoretical potential for conversion to methane were identified, physicochemical analyzes were performed to characterize important aspects in biodigestion, the maximum biochemical potential of methane in the residue was verified using the VDI 4630 methodology and estimated the financial return that can be obtained from energy production. It was possible to verify a similar theoretical potential among the vegetal residues, and thus, the seasonality of the production does not significantly affect the biodigester performance. The potato processing residue was selected because it represents almost all of the waste generated for industry, and it had a C:N ratio of 42,04, an VS content of 8.68% and a pH of 7,33. In the Biochemical Biogas Potential test, an accumulated production of 615 L/kg_{VS} was obtained in 31 days, and on the fifteenth day it reached 600 L/kg_{VS}, with an average of 50,89% of methane. The best use of this volume of biogas observed is to replace the CNG and LPG fuels consumed in the industrial unit itself. By-products such as carbon dioxide and biofertilizer, or even biogas itself, may be negotiated in partnership with producers in the region.

Keywords: Biodigestion. Biogas. Renewable energy. Industrial processing.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1: Coleta de lodo em lagoa anaeróbia para ser utilizado com inóculo	41
Fotografia 2: Sistema montado para os primeiros testes, à esquerda em provetas de 250 ml e à direita em provetas de 1000 ml.....	42
Fotografia 3: Sistema utilizado a partir do quinto teste preliminar	43
Fotografia 4: Frascos utilizados no ensaio de PBM. À esquerda, o frasco com substrato, no centro a pesagem do lodo e à direita após a adição do lodo.....	44
Fotografia 5: Tubos eudiômetros utilizados para coleta do biogás.....	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.	36
Gráfico 2: Estimativa de resíduos produzidos.	48
Gráfico 3: Curva de produção de biogás na sétima digestão.	52
Gráfico 4: Curva de produção de biogás na décima digestão.	52
Gráfico 5: Potencial Bioquímico de Biogás: produção acumulada por tempo.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Potencial de produção de metano a partir de resíduos agroindustriais em alguns dados da literatura	28
Quadro 1: Potencial de produção de metano a partir de resíduos agroindustriais em alguns dados da literatura	Erro! Indicador não definido.
Quadro 2: Custos envolvidos na substituição de fontes de energias por biogás.....	38
Quadro 2: Custos envolvidos na substituição de fontes de energias por biogás..	Erro! Indicador não definido.
Quadro 3: Resultados obtidos nos testes preliminares	50
Quadro 3: Resultados obtidos nos testes preliminares	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição nutricional de vegetais	29
Tabela 2: Aplicações de Biogás no Brasil em 2015	35
Tabela 3: Equivalência energética do biogás.....	38
Tabela 4: Produção máxima teórica de metano por tipo de resíduo	49
Tabela 5: Variáveis de entrada no ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás.....	54
Tabela 6: Resultados do ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás.....	56
Tabela 7: Estimativa da receita mensal na substituição de energias convencionais por biogás.....	57

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APHA	<i>American Public Health Association</i> / Associação Americana de Saúde Pública
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> / Sociedade Americana para Ensaio e Materiais
COT	Carbono Orgânico Total
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
GWP	<i>Global Warming Potential</i> / Potencial de Aquecimento Global
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> / Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> / Organização Internacional para Padronização
MO	Matéria Orgânica
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
PBB	Potencial Bioquímico de Biogás
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PrM	Produção de Metano
SFT	Sólidos Fixos Totais
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> / Associação dos Engenheiros Alemães

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEASA/PR	Centrais de Abastecimento do Paraná
CIBIOGÁS-ER	Centro Internacional de Energias Renováveis
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Agropecuária
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
NEPA	Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 BIOGÁS E DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	17
3.1.1 Definições e Oportunidades	17
3.1.2 Rotas Metabólicas da Biodigestão	18
3.1.3 Condições Ideais e Inibição da biodigestão	22
3.1.4 Impacto Ambiental.....	24
3.1.5 Legislação Vigente	25
3.2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	26
3.2.1 Produção Regional e Local	26
3.2.2 Biodigestão de resíduos agroindustriais.....	28
3.2.3 Produção de Energia a Partir de Biogás no Estado do Paraná.....	31
3.3 METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO.....	32
3.3.1 Potencial Bioquímico de Metano	32
3.3.2 Técnicas de estimativa de produção de biogás	33
3.4.1 A Biodigestão na Matriz Energética Brasileira	35
4. METODOLOGIA	40
4.1 LOCAL	40
4.2 COLETA DE AMOSTRAS.....	40
4.3 ANÁLISE PRÉVIA DO POTENCIAL TEÓRICO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS... 41	
4.4 TESTES PRELIMINARES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	41
4.5 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS	43
4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	45
4.6.1 Série de Sólidos	45
4.6.2 Índice de Refração	46
4.6.3 pH.....	46
4.6.4 Relação Carbono/Nitrogênio	46
4.6.5 Teor de Matéria Orgânica	47
4.6.6 Demanda Química de Oxigênio	47

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 ANÁLISE PRÉVIA TEÓRICA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS ...	48
5.2 TESTES PRELIMINARES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	49
5.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS	53
5.4 RELAÇÃO CARBONO/NITROGÊNIO	56
5.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	56
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o impacto ambiental do homem sobre a natureza é uma das maiores preocupações da sociedade moderna, sobretudo na geração de energia. A forte dependência de combustíveis fósseis na matriz energética gera incertezas quanto a um futuro sustentável, e assim a busca por energia de fonte renovável tem sido prioridade nos últimos anos.

A mudança de hábitos da população fez com que a busca por alimentos pré-processados ou prontos para consumo se tornasse uma prática cada vez mais presente, gerando um aumento do consumo de alimentos industrializados. A industrialização aumenta a vida de prateleira de produtos perecíveis, porém gera resíduos com elevada carga orgânica em processos de preparação da matéria-prima, limpeza de equipamentos e áreas de processamento, com características distintas que requerem diferentes processos de tratamento, baseado no volume e potencial poluidor (FELLOWS e NITZKE, 2018).

A digestão anaeróbia é o processo de degradação biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio onde através de uma sequência de etapas são gerados biogás (50 a 70% de CH₄) e uma nova biomassa. No Brasil, o processo é utilizado em larga escala em estações de tratamento de efluentes urbanos e industriais, onde em condições estáveis há a capacidade de remoção de 60% a 70% da carga orgânica (BRASIL, 2015).

Sistemas de digestão anaeróbia também vêm sendo utilizados em tratamentos de resíduos sólidos urbanos e esterqueiras, sendo o principal objetivo a redução de matéria orgânica, mas também pode melhorar a rentabilidade operacional e reduzir a emissão de gases de efeito estufa, utilizando o biogás como fonte de energia renovável (LIANG e MCDONALD, 2015).

A industrialização de produtos agrícolas, como a batata, gera uma grande quantidade de resíduos em forma de polpa e água residuária, ricos em amido, proteínas, açúcares, aminoácidos e potássio, com características de biodegradabilidade e que podem ser tratados a fim de se obter recursos energéticos em planta de biogás (BAYR et al. 2014).

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia como tratamento de resíduos de processamento de vegetais

visando o aproveitamento do biogás como energia e a destinação de resíduos sólidos de uma indústria de processamento de alimentos no estado do Paraná.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia do resíduo do processamento de vegetais, visando a destinação adequada de resíduos sólidos e concomitante produção de energia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar resíduo agroindustrial com potencial para digestão anaeróbia;
- Realizar testes de digestão anaeróbia em bancada avaliando parâmetros de processo;
- Determinar o máximo potencial bioquímico de metano para o resíduo em estudo;
- Propor uma solução à indústria com base nos resultados obtidos em bancada e análise de viabilidade econômica do processo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BIOGÁS E DIGESTÃO ANAERÓBIA

3.1.1 Definições e Oportunidades

A digestão anaeróbia ou biodigestão é um processo fermentativo em que a matéria orgânica complexa é convertida a compostos simples por meio de diversos grupos de microrganismos na ausência de oxigênio, reduzindo a carga orgânica de resíduos, produzindo calor, uma nova biomassa e uma energia limpa, o biogás (CIBIOGÁS-ER, 2018a).

Este processo é delicadamente balanceado e envolve processos metabólicos complexos e sequenciais, ocorre naturalmente em ambientes como pântanos, solo, sedimentos de rios, lagos e mares, assim como nos órgãos digestivos de animais ruminantes (CHERNICHARO, 2007), e em resíduos acumulados em lixões, aterros sanitários e lagoas de armazenamento de efluentes (CIBIOGÁS-ER, 2018a).

O biogás é a mistura gasosa gerada na biodigestão, composto basicamente por 50 a 75% de metano (CH_4) e 25 a 50% de dióxido de carbono (CO_2), a depender da origem e condições de processo, além de pequenas quantidades de outros gases como amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), sulfetos, vapor d'água e outros gases traço (GE et al, 2014; SENAI, 2016).

O biometano é resultante da purificação e refino de biogás, em processos de dessulfurização, remoção de gás carbônico e secagem, obtendo teores acima de 95% de metano, aumentando assim o poder calorífico e possibilitando a substituição do gás natural (BRASIL, 2015).

O gás natural possui a mesma origem do biogás, na decomposição anaeróbia de matéria orgânica depositada em camadas inferiores do solo, mares e rochas, mas é considerado combustível fóssil devido às técnicas de extração e o retorno do carbono para a atmosfera, enquanto que o biogás é obtido pelo carbono orgânico da superfície, não havendo liberação adicional de dióxido de carbono, e sim o aproveitamento da energia contida no carbono orgânico (KARLSSON et al., 2014).

Biodigestor é o reator onde ocorre a biodigestão, uma câmara hermeticamente fechada onde a formação de metano ocorre na ausência de oxigênio

e com retenção de calor. Após a digestão, o biogás e o digestato são recolhidos e é realizada uma nova alimentação com matéria orgânica (KARLSSON et al., 2014).

O digestato é o material obtido após o processo de biodigestão, podendo ser sólido ou semi-sólido, muitas vezes é utilizado como biofertilizante, pois além do baixo custo e menor impacto ambiental, possui em sua composição compostos químicos essenciais ao solo, com menor salinização e maior fixação em comparação aos fertilizantes químicos (CIBIOGÁS-ER, 2018b).

Em relação a processos aeróbios, as vantagens da digestão anaeróbia estão na baixa produção de sólidos, baixo consumo de energia, tolerância a elevadas cargas orgânicas, aplicabilidade em pequena e grande escala, além da produção de energia (CHERNICHARO, 2007; SENAI, 2016).

O processo anaeróbio também apresenta desvantagens, como a suscetibilidade das bactérias anaeróbias à inibição, processo de partida lento, o pré-tratamento quando necessário, e a remoção insatisfatória de nutrientes e patogênicos (SENAI, 2016).

Além do uso energético e da produção de digestato, a digestão anaeróbia apresenta como benefício a redução do potencial poluidor do carbono orgânico, visto que o metano já seria produzido naturalmente no tratamento de efluentes e resíduos sólidos e é 21 vezes mais nocivo ao efeito estufa do que o dióxido de carbono, devendo assim ser queimado diretamente mesmo quando não há o aproveitamento da energia (CIBIOGÁS-ER, 2016).

Desta forma, a digestão anaeróbia surge como alternativa para a redução de custos e aumento de receitas em setores como indústrias, produtores rurais, tratamento de efluentes e disposição de resíduos sólidos urbanos.

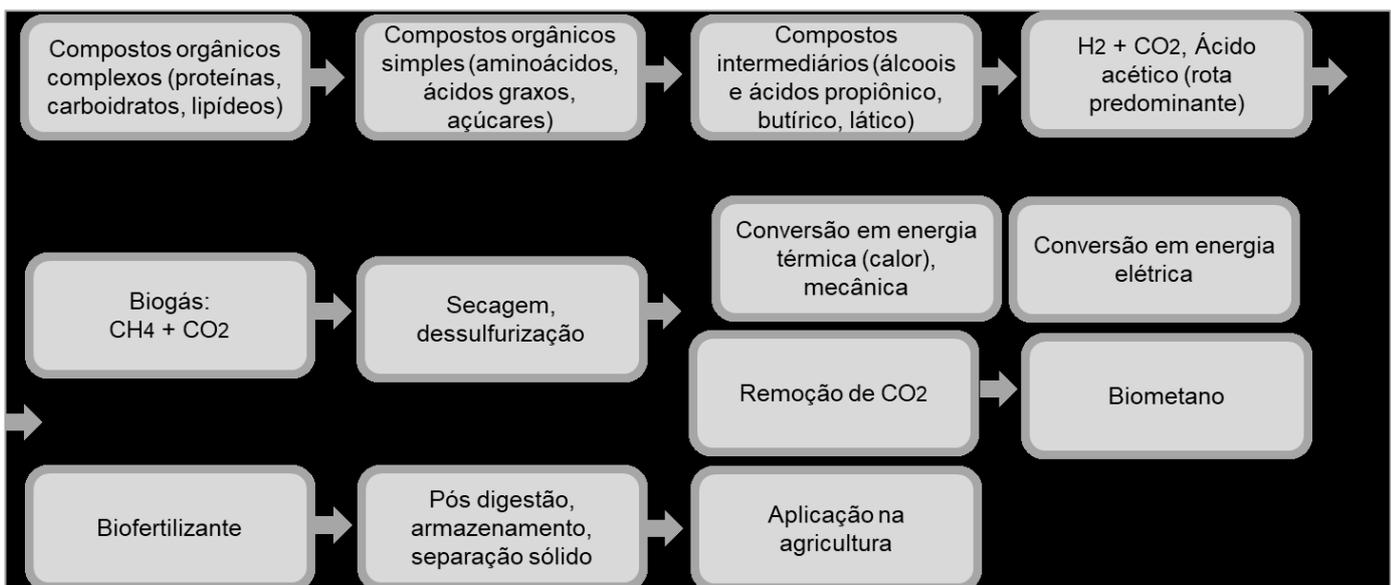
3.1.2 Rotas Metabólicas da Biodigestão

Descoberto no século XVIII por Alessandro Volta, o metano gerado nos processos de decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbias era conhecido como gás dos pântanos (SANT'ANNA JUNIOR, 2013). As arqueas metanogênicas estão entre os seres mais antigos do planeta, tendo origem entre 3 e 4 bilhões de anos atrás, onde a atmosfera era diferente da que conhecemos hoje.

Todos os compostos orgânicos podem ser degradados via digestão anaeróbia, sendo que o processo se mostra mais eficiente com resíduos facilmente biodegradáveis. A técnica tem sido largamente aplicada no tratamento de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de ETE e lixo urbano, além de efluentes de indústria agrícola, alimentícia e bebidas (CHERNICHARO, 2007).

A digestão anaeróbia apresenta maior grau de complexidade em relação à aeróbia, devido à participação de diferentes grupos microbianos com funções diferenciadas com condições ideais específicas (SANT'ANNA JUNIOR, 2013). A Figura 1 apresenta um esquema básico das etapas da biodigestão e a seguir, serão explicadas as fases do processo.

Figura 1: Esquema básico da biodigestão: rotas metabólicas e etapas práticas



Fonte: autoria própria.

A primeira etapa da digestão anaeróbia é a hidrólise de materiais particulados complexos, como carboidratos, proteínas e lipídeos, em materiais dissolvidos mais simples, moléculas menores como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão é realizada por bactérias fermentativas hidrolíticas e ocorre de forma lenta, sendo afetada por fatores como temperatura, tempo de residência, composição do substrato, pH do meio, concentração de nitrogênio e de produtos da hidrólise (CHERNICHARO, 2007).

A hidrólise é catalisada por enzimas hidrolíticas excretadas por diferentes linhagens microbianas, como *Bacteroides*, *Clostridium*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter*, *Butyrivibrio*, *Eubacterium*, *Lactobacillus* entre outros (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

A segunda etapa da biodigestão é a fermentação ácida ou acidogênese. Por meio de ação de bactérias acidogênicas, as moléculas simples geradas na etapa anterior são metabolizadas, gerando inúmeros ácidos como os propiônico, butírico e láctico (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2014).

A maioria dos microrganismos acidogênicos fermenta os produtos da hidrólise no interior das células produzindo ácidos orgânicos simples, bem como hidrogênio, gás carbônico e novas células bacterianas. Estes microrganismos são os que mais se beneficiam energeticamente no processo, e a etapa só será a limitante se a biomassa não for facilmente hidrolisável. Os principais gêneros de bactérias acidogênicas são *Bacteroides*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (CHERNICHARO, 2007).

A terceira etapa é a acetogênese ou fermentação acetogênica. É uma das etapas mais críticas do processo, sendo conduzida pelas bactérias acetogênicas, as quais estabelecem uma relação de simbiose (dependência de uma espécie sob o produto de outra, especificamente neste caso na transferência de hidrogênio) com arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas, principalmente dos gêneros *Syntrobacter* e *Syntrophomonas* (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

Nesta etapa, a partir dos compostos intermediários formados na etapa anterior, são obtidos compostos mais leves, como acetato, dióxido de carbono e hidrogênio, precursores do biogás (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2014).

A formação de acetato resulta na produção de grande quantidade de hidrogênio, fazendo com que o pH do meio diminua. A produção de acetato a partir de moléculas maiores é inibida pela presença de baixas concentrações de hidrogênio dissolvido e do próprio acetato, desta forma a reação só acontece pela ação dos microrganismos consumidores dos produtos da reação (CHERNICHARO, 2007).

A etapa final do processo global de digestão anaeróbia é a metanogênese. Realizada por microrganismos metanogênicos, atualmente classificados dentro do domínio *Archea*, um grupo anaeróbio estrito e geralmente presentes na natureza em ambientes onde aceptores de elétrons como O_2 , NO_3^- , Fe^{3+} e SO_4^{2-} são ausentes ou apresentam-se em baixas concentrações e o CO_2 apresenta-se como acceptor de elétrons (CHERNICHARO, 2007).

Em função do substrato utilizado, as bactérias metanogênicas são classificadas em acetotróficas, onde a redução para metano e ácido carbônico se dá a partir de acetato, e hidrogênotróficas, quando a formação de metano acontece a partir do consumo de gás carbônico na presença de hidrogênio (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

A diversidade morfológica das arqueas metanogênicas é extensa, são encontrados cocos, bastonetes, cocos irregulares, bastonetes longos e filamentos, e os gêneros mais comuns em digestores aneróbios são *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum* e *Methanosaeta* (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

Em reações paralelas, há a formação de compostos importantes para o processo, como a sulfetogênese. Neste processo, sulfatos, sulfitos e outros compostos de enxofre são reduzidos a sulfetos, em especial o sulfeto de hidrogênio, por bactérias sulforedutoras dos gêneros *Desulfobullus* sp., *Desulfomonas* sp., *Desulfotomaculum*, *Desulfobacter*, *Desulfococcus* entre outros, em meio estritamente anaeróbio (CHERNICHARO, 2007).

Chernicharo (2007) afirma que do ponto de vista a remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) na fase líquida, a sulfetogênese é até melhor que a metanogênese, porém a formação do gás sulfídrico resulta em problemas de corrosão, maus odores e toxicidade do meio, além de não haver a possibilidade de aproveitamento energético do metano. Em condições extremas, as bactérias redutoras de sulfato podem suplantam as bactérias metanogênicas, inibindo por completo a produção de metano (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2014).

3.1.3 Condições Ideais e Inibição da biodigestão

A complexidade do processo de biodigestão implica na necessidade de conhecer as características de cada etapa do processo e a escolha de parâmetros que ao mesmo tempo sejam viáveis para a rota metabólica e para a instalação de plantas com a máxima produção de biogás e minimizando os custos envolvidos.

Os principais fatores que influenciam na produção de biogás são a presença de oxigênio, temperatura, pH, alcalinidade, sulfatos, acidez, tamanho das partículas, produção de ácido orgânicos e a presença de nutrientes (CIBIOGÁS-ER, 2018a).

A presença de nutrientes dentro do biodigestor é fundamental para o controle do crescimento microbiano e por consequência a taxa de degradação de matéria orgânica. Os principais nutrientes em ordem de importância são nitrogênio, enxofre e fósforo, além da presença de micronutrientes como ferro, cobalto, níquel, molibdênio e selênio, completados por riboflavina e vitamina B12 (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2014).

Entre os fatores físicos que afetam a velocidade das reações bioquímicas, a temperatura é o mais importante (BRASIL, 2015). Como os microrganismos não possuem meios de controlar a temperatura interna, a temperatura no interior da célula é determinada pela temperatura ambiente (CHERNICARO, 2007).

Três faixas de temperatura podem ser associadas ao crescimento microbiano, e por consequência aos reatores, na maioria dos processos biológicos: faixa psicrófila, entre 4 e 15 °C; faixa mesofílica, entre 20 e 40 °C; faixa termofílica, entre 45 e 70 °C (BATSTONE et al, 2002). As temperaturas mínima e máxima correspondem a faixa na qual o crescimento é possível, mas é na temperatura ótima que o crescimento é máximo (CHERNICARO, 2007).

A formação de metano pode ocorrer em uma faixa bastante ampla de temperatura, porém o crescimento máximo tem sido associado na faixa termofílica, entre 50 e 55 °C, enquanto que na faixa mesofílica encontram o maior crescimento entre 30 e 40 °C (BRASIL, 2015; CHERNICARO, 2007).

Dentre todas as bactérias da biodigestão, as arqueas metanogênicas são as mais sensíveis a variações de temperatura, portanto geralmente escolhe-se a temperatura ideal para as suas condições como temperatura de processo, na faixa de 35 a 37 °C, com variação de $\pm 0,5$ °C durante o início e até ± 3 °C quando há

estabilidade da alcalinidade, para se atingir a maior produção de metano (KARLSSON et al., 2014; VDI, 2016).

Embora seja possível trabalhar na faixa termofílica, a maioria dos reatores tem sido projetados na faixa mesófila por ter como vantagens a menor demanda de energia para aquecer a reação, a maior estabilidade e qualidade do sobrenadante do processo (BAYR et al, 2014; CHERNICHARO, 2007).

A alcalinidade, acidez e pH são fatores que estão relacionados entre si e são igualmente importantes para o processo, afetando a atividade de enzimas e a toxicidade de compostos. Segundo Chernicharo (2007), os microrganismos metanogênicos tem um crescimento ótimo com pH na faixa de 6,6 a 7,4, devendo ser evitados valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3, pois podem inibir por completo a ação dos microrganismos.

Uma elevada acidez em reatores anaeróbios pode ser resultante de uma série de razões que afetam o equilíbrio da reação, causando uma instabilidade no meio, como por exemplo o excesso de substratos de fácil degradação, gerando uma alta formação de ácidos pelas bactérias acidogênicas, inibindo assim as acetogênicas e por consequência as metanogênicas (BRASIL, 2015).

A alcalinidade pode ser entendida como a capacidade de tamponamento do meio, ou seja, a capacidade de evitar mudanças de pH. Como as arqueas metanogênicas não conseguirão consumir os ácidos na mesma proporção em que são formados, e os carboidratos possuem um baixo tamponamento, a alcalinidade do reator tende a cair (KARLSSON et al., 2014). Alguns meios alcalinizantes podem ser dosados no reator, como hidróxido de sódio e carbonatos (BRASIL, 2015).

A composição do substrato afeta diretamente a produção e qualidade do biogás, sendo a relação Carbono/Nitrogênio de extrema importância. Para Karlsson et al. (2014) a proporção dependerá de cada tipo de substrato, mas está entre 20 a 30:1 no início da digestão e entre 10 a 13:1 no final do tratamento. Chernicharo (2007) ressalta que a presença de compostos como sais de amônia e ureia é benéfica como fonte de nitrogênio e manutenção do pH, a presença de amônia livre pode se tornar um inibidor quando presente em altas concentrações.

A produção de biogás é baseada na fração volátil da matéria orgânica, expressa em Teor de Sólidos Voláteis Totais (SVT), pois se trata da fração biodegradável do substrato. O Teor de Sólidos Totais (ST) representa a fração mineral

e orgânica do substrato. A literatura apresenta um teor de 4 a 6% de SVT e de até 10% de ST como ideias para o processo de biodigestão anaeróbia (KARLSSON et al., 2014; BRASIL, 2015).

As bactérias anaeróbias são sensíveis a presença de substâncias que, dependendo da concentração, podem paralisar por completo o processo de digestão, como hidrocarbonetos, compostos organoclorados, detergentes não biodegradáveis, agentes oxidantes e cátions inorgânicos (ANDREOLI, VON SPERLING e FERNANDES, 2014).

O tratamento anaeróbio de dois ou mais substratos em codigestão pode proporcionar uma melhor eficiência em relação a monodigestão, seja pela diluição de componentes tóxicos como pela adição de nutrientes ao meio (KONRAD et al., 2018).

A codigestão pode melhorar o processo, fornecendo equilíbrio de nutrientes e capacidade de tamponamento, melhorar a relação C:N e reduzir a concentração de substâncias inibidoras (BAYR et al, 2014) e ao mesmo tempo enriquecer o lodo anaeróbio utilizado.

3.1.4 Impacto Ambiental

A liberação de metano na atmosfera é um processo natural na criação de gado, cultivo de arroz, lagos e pântanos. Está presente também na extração de combustíveis fósseis, reservatórios de hidrelétricas, estações de tratamento de esgoto e na disposição de resíduos sólidos urbanos sem controle de gás, aterros e lixões.

Segundo dados do quinto Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), o gás carbônico representa aproximadamente 76% dos gases do efeito estufa. O metano vem logo em seguida, com 16% das emissões. Porém, segundo o mesmo documento, o Potencial de Aquecimento Global (GWP) do metano é 28 vezes maior que o do gás carbônico. Este parâmetro está ligado a absorção da radiação solar.

O setor de tratamento de resíduos é responsável por apenas 4% das emissões atmosféricas no Brasil, com 91,9 milhões de tonelada equivalentes de CO₂ em 2016, porém apresenta um crescimento de mais de 600% desde 1970 e 58% desde 2000 (SEEG, 2018). Mais da metade desse volume vem da disposição de

resíduos sólidos, seguido do tratamento de efluentes industriais e depois de efluentes domésticos.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – ano base 2017 (BRASIL, 2019), 60,2% da população brasileira tem acesso a rede de esgoto, incremento de 1,4% em relação ao ano anterior, sendo tratado 46,0% do esgoto gerado e 73,7% do esgoto coletado. Como o setor está em expansão e ainda há muito a melhorar, a tendência é o volume de emissões registradas aumentar.

Neste cenário, a aplicação de técnicas que reduzam o impacto do metano se faz necessária, como a implantação de aterros sanitários com controle e queima de gás e o aproveitamento energético do metano por digestão anaeróbia.

3.1.5 Legislação Vigente

A legislação ambiental no Brasil tem passado por várias atualizações, adequando-se a acordos internacionais. Uma legislação acompanhada de políticas públicas que viabilizem métodos de tratamento alternativos, como a digestão anaeróbia, é essencial para a disseminação do método e por consequência redução do impacto ambiental de processos produtivos.

A Lei Federal nº 12.305 de 02/08/2010 institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), aplicando a pessoas físicas e jurídicas, de direito público ou privado, a responsabilidade, direta ou indireta, pela geração de resíduos sólidos e o desenvolvimento de ações relacionadas à gestão integrada destes resíduos.

No Artigo 9, a PNRS permite a utilização de tecnologias que visem a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos com viabilidades técnica e ambiental comprovadas e monitoramento de emissão de gases aprovados por órgão ambiental. No tocante a resíduos orgânicos, no seu Artigo 36 a Lei cita a implantação de sistemas de compostagem e a articulação da utilização deste composto ao serviço público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos.

Ainda no âmbito federal, a ANP é responsável pelo controle e gestão de biogás e biometano com origem na decomposição biológica de resíduos orgânicos, protegendo os interesses dos consumidores quanto a preço, qualidade e oferta.

Na Resolução ANP nº 8 de 30/01/2015 a Agência estabelece a especificação do Biometano para uso veicular ou em equipamentos residenciais e comerciais. Já na

Resolução ANP nº 685 de 29/06/2017 são estabelecidas as especificações do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, destinado ao uso veicular, industrial e comercial, e a comercialização do produto em todo o território nacional.

No estado do Paraná, a Lei nº 19.500 de 21/05/2018 institui a Política Estadual do Biogás, Biometano e demais produtos derivados da biodigestão. Esta lei estabelece princípios, regras, obrigações, incentivos, apoios e fiscalização às cadeias produtivas do estado.

Para efeitos da lei, cadeia produtiva integrada envolve produtores de biogás e geradores de resíduo, sendo pessoa física ou jurídica, compartilhando a responsabilidade na adequação do resíduo sólido e efluentes gerados. A lei também classifica a transferência de resíduos como um método de destinação adequado desde que licenciado e autoriza o Poder Público a oferecer incentivos ao desenvolvimento de pesquisas na área e a fomentar a produção e consumo do biogás e seus derivados no estado do Paraná.

3.2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

3.2.1 Produção Regional e Local

Segundo dados da EMBRAPA (2016), a Batata (*Solanum tuberosum L.*) é a terceira cultura alimentar mais importante do planeta, atrás apenas de arroz e trigo, com produção anual de 330 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por produzir 3,5 milhões de toneladas anuais. O Paraná se destaca no cenário nacional, sendo o segundo maior estado em produção, com estimativa superior a 900 mil toneladas produzidas no ano de 2017 (IBGE, 2017).

No Brasil, cerca de 90% da produção de batata é destinada ao consumo *in natura*, porém o processamento industrial apresenta um crescimento significativo, seguindo a tendência da mudança de hábitos da população ao buscar produtos prontos para consumo ou com tempo de preparo mais rápido (EMBRAPA, 2016). Os produtos mais comuns obtidos a partir da batata são as formas congelada, pré-cozida e batata-palha.

A Mandioca (*Manihot esculenta*) tem grande destaque de produção e consumo em países tropicais. O Brasil é o quarto maior produtor mundial, com produção de 23,7 milhões de toneladas em 2016 (IBGE, 2017), sendo o estado do Paraná responsável por 4,3 milhões de toneladas, o segundo estado em produção no país (IBGE, 2017). Para fins industriais o Paraná ocupa o primeiro lugar, com destaque para a produção de farinha e fécula (CONAB, 2017) e também a venda da mandioca pré-cozida.

A Batata-Doce (*Ipomoea batatas*) é uma hortaliça tropical com 84% da produção mundial concentrada na Ásia. A produção brasileira chegou a 595,9 mil toneladas em 2015, com o Paraná responsável a terceira maior produção do país, produzindo 50,5 mil toneladas naquele ano (IBGE, 2017). Destaca-se além do consumo, o uso para produção de energia da hortaliça.

A produção mundial de Cenoura (*Daucus carota L.*) também é dominada pelos países da Ásia e Estados Unidos. O Brasil é o quinto maior produtor mundial com 760,6 mil toneladas em 2015, sendo desses 140 mil no Paraná (IBGE, 2017; SEAB, 2017).

A produção de grãos no Paraná tem grande destaque no cenário nacional, ocupando a posição de segundo maior produtor de soja (16,9 milhões de toneladas), milho (13,4 milhões de toneladas) e aveia (156,1 mil toneladas), e o maior produtor de trigo (3,5 milhões de toneladas), feijão (595,8 mil toneladas), cevada (203,6 mil toneladas) e centeio (2,0 mil toneladas) no ano de 2016, segundo dados do Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES, 2018).

A Microregião de Ponta Grossa, composta pelos municípios de Carambeí, Castro, Palmeira e Ponta Grossa, destaca-se na pecuária, principalmente no abate de aves e produção leiteira, mas também apresenta números significativos na produção agrícola. Na safra de 2017, os cinco municípios foram responsáveis pela produção de 92,3 mil toneladas de batata-inglesa, correspondente a 10,84% da produção no estado; 77,5 mil toneladas de feijão, 11,21% da produção estadual; 408,8 mil toneladas de milho, 2,35% da produção estadual e 826 mil toneladas de soja, correspondente a 4,33% da produção no Paraná (IPARDES, 2018).

Da mesma forma que o preparo para o consumo direto e a produção agrícola, o processamento industrial de vegetais gera uma grande quantidade de resíduos de alta carga orgânica como casca, folhas, raízes e demais partes que não serão

consumidas, além de lotes de matéria-prima e produto final descartadas no processo. O gerador tem a responsabilidade de realizar a destinação final adequada para o resíduo.

3.2.2 Biodigestão de resíduos agroindustriais

O tratamento e destinação de resíduos agroindustriais com alta carga de matéria orgânica é um entrave nas estações de tratamento de resíduos industriais. O repasse para terceiros gera despesas como armazenamento e transporte.

A biodigestão é uma técnica amplamente empregada na agropecuária e pode ser expandida para a agroindústria, devido ao fato da estrutura ser facilmente adaptada para receber os variados tipos de resíduos orgânicos, pois muitos resíduos industriais apresentam a característica de serem facilmente biodegradáveis.

Para diversos tipos de resíduos pesquisadores tem buscado maximizar a produção de metano utilizando resíduos agroindustriais dentro de seu contexto local. O Quadro 1 traz uma relação de alguns dos principais resíduos agroindustriais e a capacidade de produção de biogás ou biometano publicados em revistas internacionais:

Quadro 1: Potencial de produção de metano a partir de resíduos agroindustriais em alguns dados da literatura

Biomassa	Produção (L/kg _{SVT})	Referência	Detalhes
Mix de vegetais com pH = 6,0	354,4	RAVI et al., 2018	Mix de batata, cenoura, creme de cenoura, repolho e aipo na Alemanha
Mix de vegetais com pH = 5,5	326,8		
Resíduos de Mandioca e de destilaria de etanol	259,5	ZHANG et al., 2011	Após adaptação de 12 horas por consórcio microbiano na China
Palha de Milho	350 a 480	OKUDOH et al., 2014	Revisão bibliográfica sobre o potencial do biogás na África do Sul
Beterraba roxa	278		
Grama	280 a 550		
Beterraba açucareira	440		
Resíduos de Beterraba	254,7	HILLION et al., 2017	Coensilagem de resíduos de beterraba com palha de trigo em diferentes tempos de armazenagem
Palha de Trigo	258,1		
Beterraba + Palha de Trigo	234 a 249		
Batata + resíduos animais	450 a 680	BAYR et al., 2014	Codigestão de polpa de batata com resíduos de tecidos animais
Batata-doce, Mamão Papaya, Albizia e Inhame	371 a 411	GE et al., 2014	Codigestão de frutas e verduras tropicais no EUA
Batata	276 a 400		

Beterraba	236 a 381	KOÇAR e CIVAŞ, 2013	Revisão sobre o potencial de produção de biocombustíveis na Turquia
Milho (colheita inteira)	205 a 450		
Ervilhas	390		
Resíduos de Batata	239	LIANG e MCDONALD, 2015	Codigestão de resíduos de processamento de batatas com ácido láctico nos EUA
Resíduos de Batata + resíduos de ácido láctico	273		
Batata e Repolho (batelada)	295	MU et al., 2017	Digestão em batelada e semi-contínua de resíduos de batata e repolho na China
Batata e Repolho (semi-contínuo)	360		
Beterraba açucareira (in natura)	285	ZIEMINSKI et al., 2014	Digestão de beterraba <i>in natura</i> e após hidrólise térmica, com melhor resultado a 160 °C
Beterraba açucareira (após hidrólise)	425 a 503		

Fonte: Elaboração própria.

Resíduos agrícolas são compostos basicamente de celulose, hemicelulose e lignina, ligados às fibras vegetais, os quais após hidrolisados são convertidos em açúcares simples (ALAVIJEH e YAGHMAEI, 2016).

Bozym et al. (2015) afirmam que a biomassa gerada por resíduos vegetais é ideal para a digestão anaeróbia e pode produzir mais metano do que esterco animal e esgoto doméstico.

A composição da biomassa vegetal pode variar em produções de uma mesma espécie, devido a condições diferentes de localização geográfica, variedade e estação de colheita, afetando diretamente o rendimento da digestão anaeróbia, portanto, a caracterização é importante para estimar a produção de metano (GE et al, 2014). A similaridade entre os variados tipos de resíduos apresenta-se como uma possibilidade de codigestão em um mesmo reator.

A Tabela 1 apresenta valores de Umidade, Nitrogênio, Carboidratos, Fósforo e Cinzas em gramas por 100 g de base seca para as hortaliças, cozidas e cruas, as quais serão utilizadas neste estudo, de acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos do NEPA (2011):

Tabela 1: Composição nutricional de vegetais

(continua)

Vegetal	Umidade (%)	Nitrogênio (b.s., g/100g)	Carboidratos (b.s., g/100g)	Fósforo (b.s., g/100g)	Cinzas (b.s., g/100g)
Batata inglesa (cozida)	86,4	1,41	87,5	0,18	0,5
Batata inglesa (crua)	82,9	1,68	86,0	0,23	0,6
Batata doce (cozida)	80,4	0,49	93,9	0,08	0,4

Tabela 1: Composição nutricional de vegetais

					(conclusão)
Batata doce (crua)	69,5	0,68	92,5	0,12	0,9
Beterraba (cozida)	90,6	2,21	76,6	0,32	0,8
Beterraba (crua)	86,0	2,17	79,3	0,14	0,9
Cenoura (cozida)	91,7	1,54	80,7	0,33	0,6
Cenoura (crua)	90,1	2,10	77,8	0,28	0,9
Mandioca (cozida)	68,7	0,31	96,2	0,07	0,4
Mandioca (crua)	61,8	0,46	94,8	0,08	0,6
Milho Verde (cru)	63,5	2,89	78,4	0,31	0,7
Feijão Preto (cru)	14,9	4,00	69,1	0,55	3,8
Feijão Preto (cozido)	80,2	3,64	70,7	0,44	0,8
Ervilha (crua)	76,8	5,17	61,2	0,66	1,0
Grão-de-bico (cru)	12,3	3,87	66,0	0,39	3,2
Lentilha (crua)	11,5	4,01	70,1	0,42	2,6
Lentilha (cozida)	76,3	4,25	68,8	0,44	0,6

b.s.: base seca. Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (NEPA, 2011)

De acordo com a caracterização realizada por Liang e McDonald (2015), o resíduo sólido do descasque de batatas apresenta 39,3% de carboidratos, 21,3% de lignina e 2% de lipídeos, e ainda 43,8% de Carbono e 4,1% de Nitrogênio em base seca. Para Carapinha (2012), a casca de batata apresentou 52,9% (m/m) de carbono em base seca, 0,51 % (m/m) de Nitrogênio Total Kjeldahl e DQO de 37,2 g.O₂.L⁻¹.

Zhang et al. (2018) caracterizaram sete variedades diferentes de batata doce roxa, obtendo de 0,30 a 0,60% (m/m) de nitrogênio, 40,1 a 55,1% (m/m) de amido e 11,6 a 21,7% (m/m) de açúcares solúveis, sendo todas as análises em base seca. Ge et al. (2014) produziram biogás a partir de resíduos de produtos tropicais, utilizando entre eles a batata doce, com 44,8% (m/m) de Carbono Total e 1,0% (m/m) de Nitrogênio Total obtidos por analisador elementar.

Apenas no processamento de batatas são gerados entre 70 e 140 mil toneladas anuais de cascas e polpa no mundo, resíduo este tradicionalmente encaminhado para alimentação animal, mas que vem sendo valorizado com pesquisas concentradas na produção de energia, além de extração de compostos fenólicos antioxidantes, ácido lático e alcaloides esteroidais (WU, 2016; LIANG e MCDONALD, 2015).

Além da rota bioquímica pela digestão anaeróbica, a produção de energia a partir de biomassa vegetal pode ser conseguida por rotas termoquímicas, como a pirólise. Porém, apesar de mais rápida, esta técnica requer consumo maior de energia e não possibilita a valorização de compostos seletivos, como o metano e o bioetanol (ALAVIJEH e YAGHMAEI, 2016).

Os principais resíduos gerados no processamento industrial de vegetais são águas residuárias do processo de lavagem, casca e polpas geradas no beneficiamento. Estes resíduos também são gerados no transporte, distribuição e produção final para o consumidor.

3.2.3 Produção de Energia a Partir de Biogás no Estado do Paraná

Ribeiro e Raiher (2013) exploraram o potencial de produção de energia renovável no estado do Paraná, destacando oportunidades na produção de biogás a partir de vinhaça de cana-de-açúcar e a partir de dejetos de suínos. Os autores mostram que a viabilidade na produção é alcançada quando o produtor não apenas resolve o problema no tratamento de efluentes, mas também gera sua própria energia a partir do resíduo e ainda pode comercializar o excedente gerado.

No estado do Paraná, há iniciativas visando a produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos e lodo de esgoto, como do consórcio CS Bioenergia, na região metropolitana de Curitiba: inicialmente serão tratados os resíduos das Centrais de Abastecimento do Paraná (CEASA/PR) e posteriormente de centros comerciais e restaurantes da cidade, evitando a sobrecarga de resíduos orgânicos em aterros sanitários e produzindo energia suficiente para abastecer duas mil residências (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2019).

Outra iniciativa está presente em Foz do Iguaçu, com a Unidade de Demonstração Itaipu, onde são tratados os resíduos orgânicos gerados no Parque Tecnológico de Itaipu, como resíduos de restaurantes, poda de vegetações e no tratamento de efluentes, gerando energia utilizada para abastecer a frota local (CIBIOGÁS-ER, 2018c).

Apesar das iniciativas citadas, o estado produz apenas 1% do potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás (HISING, 2018). Considerando a grande diversidade de biomassa disponível na região, há muito a ser explorado.

3.3 METODOLOGIAS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO

3.3.1 Potencial Bioquímico de Metano

O Potencial Bioquímico de Metano (PBM) é o método utilizado para estimar a produção de metano a partir de testes experimentais em escala de bancada. São utilizadas condições ideais de processo para maximizar a produção de gás, apesar de na prática nem sempre as condições são viáveis de ser alcançadas. Algumas associações internacionais padronizaram e certificaram metodologias, como a ISO 11734, ASTM E-2170-01 e VDI 4630.

A norma VDI 4630 (2016) estabelece a caracterização de substratos, amostragem, coleta de dados e procedimento de teste de digestão anaeróbia de materiais orgânicos, será utilizada neste trabalho e descrita neste tópico.

A publicação cita alguns cuidados que devem ser tomados para garantir a confiabilidade do resultado, como a temperatura do processo e temperatura ambiente, a execução em paralelo de amostras apenas com inóculo e também com um padrão com produção de biogás conhecido (celulose microcristalina) para comprovar a eficiência do inóculo, a vedação da coluna d'água com solução salina e ácida, a lavagem das vidrarias e incubação com gás nitrogênio para retirar o residual de oxigênio e um fator de correção para volume de acordo com a pressão e temperatura ambientes.

O lodo utilizado como inóculo deve ser estritamente anaeróbio e cultivado na temperatura da incubação, preferencialmente adaptado ao substrato a ser utilizado. Geralmente são coletados lodos de biodigestores ou de reatores anaeróbios de estações de tratamento de esgoto.

A metodologia também propõe que a relação entre a massa de SVT do lodo adicionado como inóculo e da amostra não deve ser superior a 0,5, para que não haja acidificação por excesso de carga orgânica. O PBM é calculado pela razão entre o volume de gás produzido e a quantidade de sólidos voláteis adicionados.

A leitura do gás em volume e composição química é realizada diariamente na fase inicial e com uma frequência menor na fase estacionária, até que a diferença de

volume produzido seja menor que 0,5% em três dias. O tempo de reação varia de acordo com as características da amostra analisada.

3.3.2 Técnicas de estimativa de produção de biogás

Aquino et al. (2007) apresentam métodos manométricos e volumétricos para determinação da atividade metanogênica de lodos anaeróbios, e por consequência, da produção de biogás para um substrato específico.

Os métodos manométricos baseiam-se na medição da pressão exercida sobre um sensor acoplado em um frasco reator: a pressão medida poderá ser exercida pelo biogás, que pode ter a concentração de metano lida por cromatografia ou apenas por metano, quando o gás carbônico é consumido por pastilhas de NaOH, como em frascos adaptados de análise de Demanda Bioquímica de Oxigênio.

Como o teste não é realizado nas condições normais de temperatura e pressão, a pressão será convertida a unidade de volume pela equação dos gases ideais, pela Equação 1:

$$(P_1 \times V_1 / T_1)_{\text{CNTTP}} = (P_2 \times V_2 / T_2)_{\text{Laboratório}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P_1 = pressão nas CNTTP (1 atm)

V_1 = volume do gás nas CNTTP (22,7 L)

T_1 = temperatura nas CNTTP (273 K)

P_2 , V_2 e T_2 = pressão, volume e temperatura no qual o teste foi conduzido

Os autores dividem os métodos volumétricos em determinação de volume e composição de biogás, apenas composição de biogás e volume direto de metano. A reação pode ocorrer em frascos vedados onde o biogás poderá ser retirado com o auxílio de seringas, onde poderá ser determinado o volume e/ou apenas composição do biogás, ou por mangueiras conectadas a frascos graduados invertidos e submersos onde o volume será lido por deslocamento de líquido. O gás poderá passar por uma solução de NaOH quando se quer diretamente a concentração de metano.

Algumas estimativas teóricas para produção de biogás foram apresentadas por Mito et al. (2018) para dejetos bovinos e suínos, levando em consideração parâmetros específicos para este tipo de resíduos. O cálculo proposto por Kunz e Oliveira (2006) pode ser adaptado para demais substratos orgânicos, apresentado na Equação 2:

$$Q_{CH_4} = B_0 \times SVT \times Q \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q_{CH_4} = produção de metano ($m^3_{CH_4}/dia$)

B_0 = capacidade máxima teórica da produção de metano ($m^3_{CH_4}/kg_{SVT}$)

SVT = teor de sólidos voláteis totais (%)

Q = volume total de substrato disponível por dia (m^3/dia)

A produção teórica de metano também pode ser calculada por balanço estequiométrico onde um mol de CH_4 requer 2 moles de O_2 para oxidação completa:



A partir da Equação 3, Chernicharo (2007) apresenta o cálculo para estimar o volume de metano produzido por grama de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e fator de correção para temperatura de processo do reator:

$$Q_{CH_4} = DQO_{CH_4} / f(T) \quad \text{Equação 4}$$

$$f(T) = P \times K_{DQO} / R \times (273 + T) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Q_{CH_4} = produção de metano ($m^3_{CH_4}/dia$)

DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator e convertida em metano (g_{DQO})

$f(T)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator (kg_{DQO}/m^3)

P = pressão atmosférica (1 atm)

K_{DQO} = DQO correspondente a 1 mol de metano ($64 g_{DQO}/mol$)

R = constante dos gases ($0,08206 atm.L/mol.K$)

T = temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$)

Desta forma, a partir da produção de metano pode-se calcular diretamente o grau de conversão da matéria orgânica e por consequência a eficiência do sistema de tratamento.

3.4 ASPECTOS ECONÔMICOS DA AQUISIÇÃO DE UM BIODIGESTOR

3.4.1 A Biodigestão na Matriz Energética Brasileira

As principais aplicações do biogás são a produção de energia elétrica, energia térmica, energia mecânica e a conversão em biometano. A Tabela 2 traz um panorama da utilização do biogás produzido no Brasil em 2015:

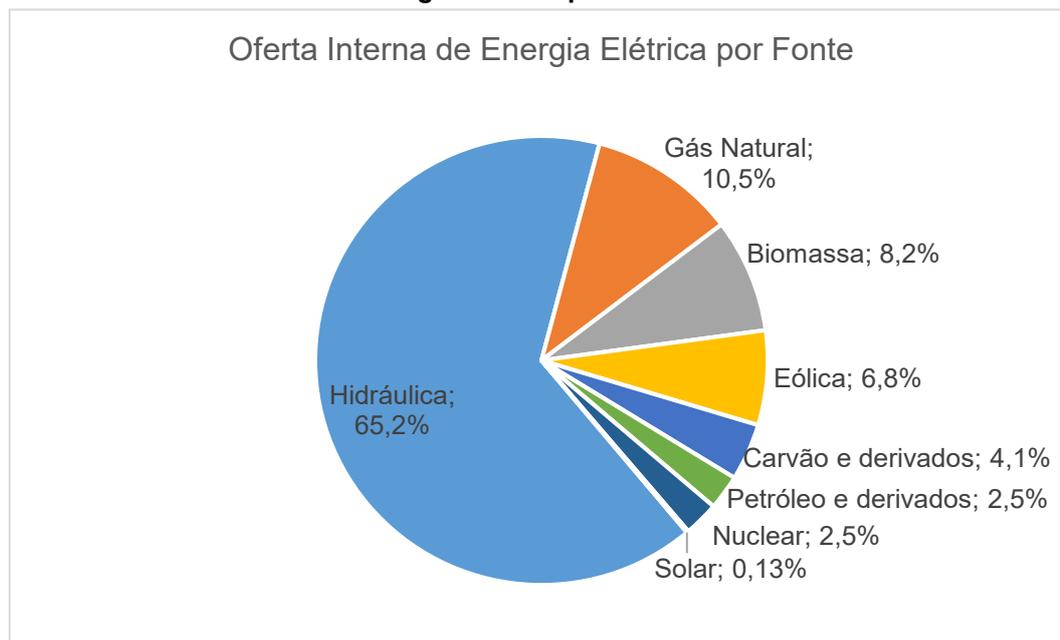
Tabela 2: Aplicações de Biogás no Brasil em 2015

Aplicações do Biogás	Produção de Biogás (m³/dia)	
Energia Elétrica	1.075.626	65,5%
Energia Térmica	513.507	31,3%
Energia Mecânica	45.377	2,8%
Biometano	6.880	0,4%
Total	1.641.391	100%

Fonte: Relatório GAHB sobre Biogás e Biometano (CIBIOGÁS-ER, 2016)

A Tabela 2 considera o principal uso em cada biodigestor instalado, embora haja usos diversificados em uma mesma propriedade. A conversão nas energias elétrica e térmica é a técnica mais simples e difundida no país há muitos anos.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2017) enquanto que na matriz energética mundial apenas 24% da oferta de energia corresponderam a fontes renováveis em 2016, no Brasil este número chegou a 80,4%. Porém, o Brasil apresenta uma grande dependência da energia hidrelétrica. O Gráfico 1 mostra a oferta interna de energia elétrica brasileira em 2017:

Gráfico 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Fonte: Balanço Energético Nacional (EPE, 2018, p. 16).

O Gráfico 1 mostra a alta dependência de usinas hidrelétricas na matriz energética brasileira. A energia proveniente de biomassa, onde está inserido o biogás, corresponde a 8,2% do da oferta nacional de energia. A capacidade instalada de energia elétrica por biogás subiu de 20 MW em 2007 para 135 MW em 2017 (EPE, 2018).

Para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019), a capacidade de energia elétrica por biogás instalada passou de 150 MW em 2019, sendo 137,7 MW em usinas de tratamento de resíduos sólidos urbanos, 4,5 MW em usinas de resíduos animais e 7,9 MW em usinas de resíduos agroindustriais.

A energia elétrica produzida a partir de biogás pode aderir ao sistema de compensação de energia estabelecido pela ANEEL na Resolução nº 482/2012, a qual permitiu fontes de energia renovável a entrarem no mercado de compensação onde a energia produzida pode ser convertida em créditos ou injetada na rede da concessionária local, onde pode ser acumulada e debitada por até 60 meses ou vendida no mercado livre de energia (CIBIOGÁS-ER, 2018a).

O biogás pode substituir o gás natural em muitas aplicações. O fato de ser renovável e poder ser produzido em todos os locais onde há disponibilidade de biomassa, são vantagens em relação ao gás natural, já como desvantagens estão o

menor poder calorífico e a presença de sulfeto de hidrogênio e umidade (SOUZA, 2016).

A conversão de biogás em energia térmica pode ser gerada como combustível na queima direta em caldeiras, fogareiros e fornos, substituindo lenhas e combustíveis fósseis, ou na cogeração em trocadores de calor no escape de motores geradores de energia; já a conversão em energia mecânica muitas vezes é utilizada em bombas no próprio biodigestor para transporte de biofertilizante (CIBIOGÁS-ER, 2018a).

Para Stilpen, Stilpen e Mariani (2018), a produção e uso de biometano está atrelada a barreiras técnicas e logísticas, especialmente ao custo no processo de refino e a produção de biogás ocorrer geralmente distribuída em pequenas escalas no Brasil. Os autores ainda ressaltam que a criação de um mercado regulado de biometano para uso veicular pode ser viável em regiões onde não há distribuição de GNV, e ainda onde há a distribuição, a logística existente pode ser aproveitada para a distribuição de biometano.

A utilização de unidades de refino de biogás para gerar biometano e assim abastecer frotas internas de veículos ou motores é uma prática crescente no país, como por exemplo no Complexo Itaipu, Granja Haacke e Condomínio Ajuricaba no oeste do Paraná (CIBIOGÁS-ER, 2016) e na Chácara Marujo, nos Campos Gerais (SILVA, 2018).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece as especificações para inserção do biometano na rede de gás natural. Para que seja possível a utilização veicular e a inserção na rede de gás natural, são necessários alguns parâmetros de qualidade, sendo o principal deles o teor de metano, o qual aumenta consideravelmente o poder calorífico do gás, a remoção de impurezas como H_2S , NH_3 , siloxanos e vapor d'água e o ajuste de pressão (BRASIL, 2016).

3.4.2 O BIOGÁS COMO ENERGIA ALTERNATIVA

O biogás possui, em suas condições típicas de produção (50 a 80% de metano), poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m³ (COLDEBELLA, 2006). A Tabela 3 apresenta a equivalência energética do biogás em relação a outras fontes de energia:

Tabela 3: Equivalência energética do biogás

Fonte de energia	Equivalência em m ³ de biogás
Gasolina (L)	0,613
Querosene (L)	0,579
Diesel (L)	0,553
Álcool (L)	0,790
GLP (kg)	0,454
Carvão Mineral (kg)	0,735
Lenha (kg)	1,538
Eletricidade (kWh)	1,428

Fonte: SGANZERLA, 1983; COLEBELLA, 2006.

Para a escolha da forma de utilização como energia devem ser avaliados fatores como a demanda de um combustível específico, disponibilidade de espaço e instalações, possibilidade de investimentos e custo da energia.

Souza et al (2019) compararam a viabilidade da utilização do biogás como substituto do óleo diesel, GNV, GLP e geração combinada de energia elétrica e calorífica em uma propriedade no oeste do Paraná aplicando o método *payback* simples para um biodigestor com produção mensal de 12 mil m³ de biogás. O Quadro 2 apresenta os diversos custos envolvidos na substituição de outras formas de energia por biogás segundo os autores.

Quadro 2: Custos envolvidos na substituição de fontes de energias por biogás

	Planta básica de biogás	Diesel	GNV	GLP	Energia Elétrica/calor
Projeto executivo	X	X	X	X	X
Construção civil	X				
Equipamentos	X				
Terraplanagem	X				
Instalações Elétricas	X	X	X	X	
Utilidades	X	X	X	X	
Alimentadores	X				
Refinaria	X	X	X		X
Tanque de equalização	X				

Adaptação de veículos		X	X		
Posto de biometano		X	X		
Autogeração		X	X	X	
Compressão do biogás				X	
Motogerador					X
Caldeira de recuperação					X
Subestação elétrica					X
Custo total por m ³ de biogás	R\$377,50	R\$739,32	R\$479,17	R\$659,75	R\$844,17
<i>Payback</i> simples	-	13 meses	13 meses	11 meses	38 meses

Fonte: SOUZA et al, 2019

O custo operacional da planta básica está em torno de 2,5 a 4% do custo da construção, e pode ser reduzido quando é viável o transporte do resíduo entre os tanques por gravidade e posterior carregamento do biodigestor (MARTINS e OLIVEIRA, 2011; SOUZA et al, 2019).

Além da energia gerada, também podem ser considerados como receitas da biodigestão a aplicação do biofertilizante em cultivos próprios ou mesmo a venda, desde que esteja aprovado pela legislação vigente (CIBIOGÁS-ER, 2018b), a venda do CO₂ separado no processo de refino (SOUZA et al, 2019) e os custos evitados com a destinação adequada dos resíduos sólidos orgânicos.

4. METODOLOGIA

4.1 LOCAL

Os testes preliminares de digestão anaeróbia em bancada e a caracterização das amostras foram realizadas no campus Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, localizado na Avenida Monteiro Lobato s/n km 04, CEP 84016-210, nos laboratórios de Fermentações e de Análise de Alimentos, vinculados ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano foi realizado no Laboratório de Biogás da CIBIOGÁS-ER, acreditado pela norma ISO/IEC/17025:2017, localizado no Parque Tecnológico de Itaipu, em Foz do Iguaçu, Paraná

4.2 COLETA DE AMOSTRAS

As amostras de resíduos de processamento de vegetais foram coletadas em uma indústria na região dos Campos Gerais. Os variados tipos de resíduos foram selecionados de acordo com a programação de produção na data da coleta.

O inóculo para os testes preliminares foi coletado na própria indústria. Nos primeiros testes utilizou-se água residuária da linha de produção e posteriormente, com o objetivo de conseguir melhores resultados, coletou-se lodo na lagoa anaeróbia da estação de tratamento de efluentes industriais a uma profundidade de aproximadamente 3 metros, como mostra a Fotografia 1.

Fotografia 1: Coleta de lodo em lagoa anaeróbia para ser utilizado com inóculo



Fonte: autoria própria.

Imediatamente após a coleta, as amostras foram armazenadas sob refrigeração nos laboratórios da UTFPR.

4.3 ANÁLISE PRÉVIA DO POTENCIAL TEÓRICO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Uma análise prévia com base em dados na literatura foi realizada e apresentada para a indústria escolhida para este estudo. Após um contato inicial, foi levantada a quantidade de resíduo orgânico gerado em cada etapa do processamento e a variabilidade de produção de cada resíduo. Encontrou-se na literatura (Quadro 1) o potencial metanogênico para resíduos semelhantes e realizou-se o cálculo do potencial teórico da produção de biogás (Equação 2) a partir dos dados de produção fornecidos pela indústria.

4.4 TESTES PRELIMINARES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Por se tratar de um projeto de pesquisa pioneiro no Laboratório de Fermentações, foi necessária a montagem de um sistema para a realização testes

preliminares de digestão anaeróbia e adaptações a cada novo experimento, aprimorando o sistema e evitando os erros observados nos testes anteriores.

Foram realizados dez testes preliminares de digestão anaeróbia no sistema montado em bancada durante os meses de março de 2018 a maio de 2019. A cada teste, variáveis foram otimizadas: teor de sólidos, temperatura de processo, vidrarias utilizadas, *headspace* dos frascos, adição de bicarbonato de sódio, lodo utilizado como inóculo e o tipo de resíduo utilizado como substrato.

As amostras de resíduos de processamento de vegetais passaram por moagem antes da inoculação, com o objetivo de homogeneizar a polpa e casca presentes no material e também os diferentes tipos de vegetais quanto utilizados em uma mesma digestão. O lodo nos testes preliminares foi utilizado como chegou da indústria, com exceção do último teste, quando realizou-se uma climatização por 24 horas.

Como reator, foram utilizados frascos de 1000 ml hermeticamente fechados e com saída de gás na parte superior. Para a cúpula de gás, utilizou-se provetas invertidas imersas em água. A medição do volume de gás foi percebida pelo deslocamento de líquido na coluna d'água, utilizando provetas graduadas inicialmente de vidro de 250 ml e posteriormente de plástico de 1000 ml, como mostra a Fotografia 2.

Fotografia 2: Sistema montado para os primeiros testes, à esquerda em provetas de 250 ml e à direita em provetas de 1000 ml



Fonte: autoria própria.

Para os primeiros testes, foram utilizadas as tampas originais dos frascos com um orifício e vedação com silicone, porém foram identificados vazamentos em alguns dos frascos, e desta forma foram adquiridas tampas específicas para trabalho com produção de gases, como pode ser observado na Fotografia 3. Também foram substituídas as mangueiras por outras com diâmetro maior, o que evitou eventuais entupimento das mesmas por fragmentos de substrato.

Fotografia 3: Sistema utilizado a partir do quinto teste preliminar



Fonte: autoria própria.

Os frascos foram mantidos em banho-maria com agitação manual diária. Periodicamente trocou-se a água presente nas provetas invertidas, anotando o volume de gás gerado até aquele instante. A temperatura do banho-maria foi controlada analogicamente pelo equipamento e confirmada com termômetro externo.

Optou-se por não utilizar solução selante ácida devido a necessidade de manuseio diário e o experimento estar instalado em um local de grande movimentação de pessoas. Devido a isso, deve ser considerado a dissolução do gás na água como um erro na medição de volume.

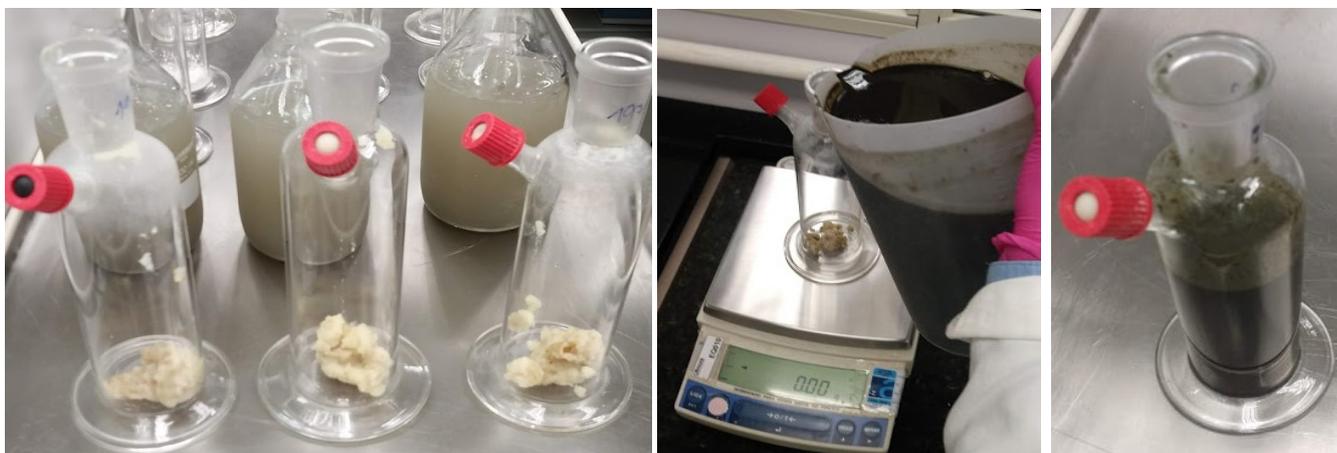
4.5 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS

O ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás (PBB) e de Metano (PBM) foi realizado seguindo a metodologia padrão VDI 4630 (2016). Utilizou-se como substrato

resíduo do processamento de batata inglesa e como inóculo lodo anaeróbico cultivado em condições mesofílicas especificamente para este ensaio em biorreator em escala de bancada.

Realizou-se em paralelo a digestão de substrato com inóculo, de padrão de celulose microcristalina com inóculo e apenas do inóculo, todos em triplicata. Para obter-se o Potencial Bioquímico de Metano (PBM) realizou-se a leitura do teor de metano no biogás através do analisador portátil Landtec 5000. Na Fotografia 4 é possível observar os frascos com substrato e inóculo utilizados no ensaio.

Fotografia 4: Frascos utilizados no ensaio de PBM. À esquerda, o frasco com substrato, no centro a pesagem do lodo e à direita após a adição do lodo



Fonte: autoria própria.

As amostras foram inoculadas em banho-maria a $37 \pm 2^\circ\text{C}$ com temperatura ambiente controlada em $24 \pm 2^\circ\text{C}$. O volume de biogás produzido foi lido diariamente em tubos eudiômetros conectados nos frascos e previamente lavados com nitrogênio gasoso para retirada do oxigênio residual e verificação de possíveis vazamentos, conforme observado na Fotografia 5.

Fotografia 5: Tubos eudiômetros utilizados para coleta do biogás



Fonte: autoria própria.

As amostras permaneceram incubadas por 31 dias, conforme programação de análises do laboratório.

4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

4.6.1 Série de Sólidos

A série de sólidos foi realizada a cada nova batelada para o substrato, lodo e frascos inoculados antes e depois da digestão anaeróbia, conforme procedimento padrão *Standard Methods* da APHA (2012) em triplicata. As amostras foram submetidas a secagem em estufa por 24 horas a 105 °C e posterior calcinação a 550 °C até massa constante.

4.6.2 Índice de Refração

O índice de refração representa o conteúdo de sólidos dissolvidos em água, como açúcares, sais, proteínas e ácidos. Como os sólidos dissolvidos em batata são basicamente constituídos de sacarose, a medida pode ser utilizada como uma medida indireta ao teor de açúcares (CARDOSO et al., 2017). Utilizou-se o Refratômetro Analógico AKSO RBH32 como um teste rápido e indireto para a determinação do teor de sólidos nos frascos antes da inoculação e assim ajustar a proporção substrato/inóculo. Posteriormente o teor de sólidos totais e voláteis foi confirmado.

4.6.3 pH

O pH foi medido em pHmetro digital Even PHS-3E nas amostras brutas de resíduo e lodo e também antes e após cada digestão.

4.6.4 Relação Carbono/Nitrogênio

A análise de Carbono Orgânico Total foi realizada pelo método de oxidação química a quente, baseado nas metodologias de Kiehl (1998) e BRASIL (2014). As amostras foram digeridas em um meio com 40 ml de Ácido Sulfúrico PA e 50 ml de Dicromato de Potássio 1 mol.L^{-1} , em chapa aquecedora a $140 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 minutos. Optou-se pela fonte de calor para que fosse determinada a fração total de carbono orgânico. No excesso oxidante foi adicionado 200 ml de água destilada e 10 ml de Ácido Fosfórico PA e 1 ml de indicador difenilamina. Após esfriar, realizou-se titulação com Sulfato Ferroso Amoniacal 1 mol.L^{-1} até o ponto de viragem. Paralelamente, realizou-se o procedimento para uma amostra branco.

A análise de Nitrogênio foi realizada pelo método micro Kjeldahl, o qual inclui as formas orgânicas e amoniacal (SOUZA et al, 2016). As amostras foram submetidas a digestão a quente em Ácido Sulfúrico 96% na presença de solução catalítica composta por Sulfato de Sódio e Sulfato de Cobre na proporção 7:1. O resultado da digestão passou pela Unidade de Destilação Kjeldahl, na presença de Hidróxido de

Sódio 30% e Ácido Bórico 2% com indicador misto no destilado e posterior titulação com Ácido Sulfúrico 0,05 mol.L⁻¹.

Ambas as análises foram realizadas em base seca, com amostras submetidas a secagem a 85 °C por 48 horas e trituração para redução do tamanho da partícula. Com a razão entre as duas análises, obtém-se a relação C:N.

4.6.5 Teor de Matéria Orgânica

O Teor de Matéria Orgânica foi determinado pelo método da mufla estabelecido por Goldin (1987) com adaptações. As amostras desidratadas a 85 °C por 48 horas foram calcinadas em forno mufla a 550 °C por 3 horas. A massa volátil corresponde ao teor de matéria orgânica da amostra.

4.6.6 Demanda Química de Oxigênio

A análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi determinada conforme APHA (2017) no laboratório de físico-química da Estação de Tratamento de Esgoto Verde da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) com kits para DQO, da fabricante Hach antes e depois em um dos testes preliminares de digestão anaeróbia realizados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

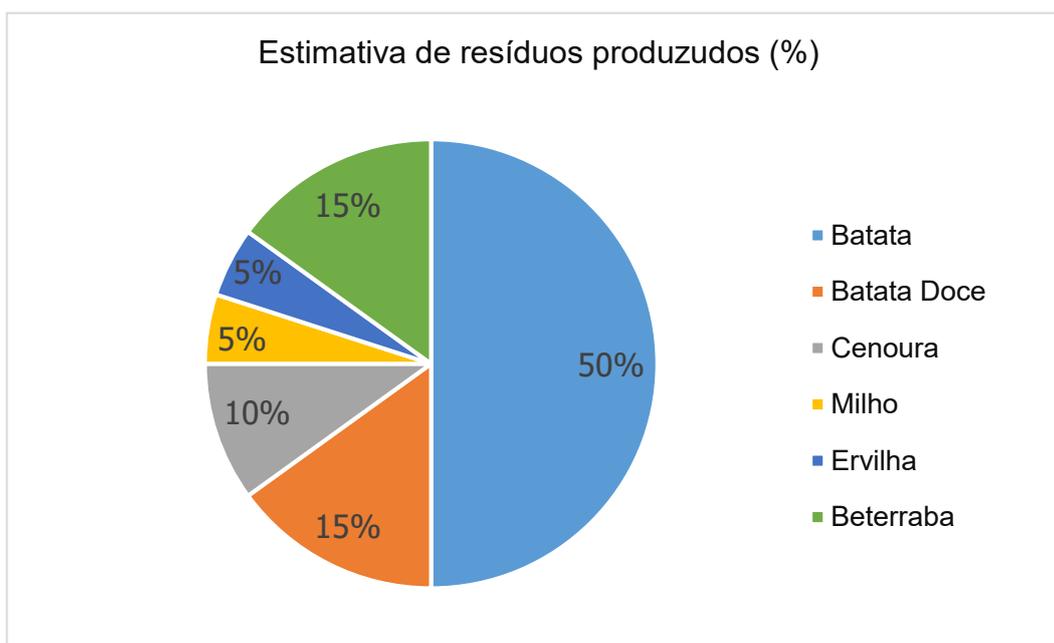
5.1 ANÁLISE PRÉVIA TEÓRICA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Dados fornecidos pela indústria apontam que há uma produção de resíduos orgânicos em torno de 93 toneladas/mês, sendo aproximadamente 86% deste valor correspondente a resíduos de descasque de vegetais; 8% vindo da linha de processamento: defeitos identificados após o descasque, resíduos da higienização e produtos que caem no chão; e 5% são resíduos de produto final onde foi identificado alguma não conformidade.

A produção de alimentos é sazonal, dependendo de fatores como a demanda de produto final e oferta de matéria prima. A quantidade e variedade de resíduos gerado no processo depende diretamente da produção, porém o resíduo do processamento de batata inglesa é gerado em maior quantidade ao longo do ano, representando de 50 a 70% do total.

O Gráfico 2 apresenta uma estimativa de cada parcela de resíduos produzidos, considerando um cenário onde o resíduo do processamento de batatas está em 50%:

Gráfico 2: Estimativa de resíduos produzidos



Fonte: autoria própria.

Considerando uma produção mensal de 93 toneladas de resíduos com uma média de 10% de Sólidos Voláteis Totais, a estimativa de produção observada no Gráfico 2 e a produção média de metano através de resíduos de processamento de vegetais, descrita na Tabela 1, foi possível realizar uma projeção da produção de metano, como pode ser verificado na Tabela 4:

Tabela 4: Produção máxima teórica de metano por tipo de resíduo

	Média (m ³ /T _{SVT})	Produção de resíduos (T/mês)	Produção máxima teórica de metano (m ³ /mês)
Batata	349,49	46,50	1.625,10
Batata Doce	411,00	13,95	573,35
Cenoura	339,00	9,30	315,27
Milho	382,50	4,65	177,86
Ervilha	390,00	4,65	181,35
Beterraba	356,95	13,95	497,95
Total	418,18	93,00	3.370,88

Fonte: autoria própria.

Portanto, caso toda a matéria orgânica residual fosse convertida em biogás, a produção máxima pode chegar a 3.370,88 m³/mês de metano.

5.2 TESTES PRELIMINARES DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Nos primeiros testes, utilizou-se água residuária da indústria como inóculo. Como substrato, purê de batata inglesa, purê de batata salsa e batata inglesa na primeira, segunda e terceira batelada respectivamente.

Utilizou-se índice de refração (3 e 5 °Brix) como parâmetro para determinar a diluição, confirmados posteriormente com a análise de sólidos totais. Inicialmente, a temperatura de incubação foi de 25 °C, com o objetivo de se aproximar da temperatura ambiente.

Para o quarto teste, preparou-se uma mistura de diversos substratos: beterraba, batata, mandioca, batata-doce, milho e feijão. Essa mistura foi inoculada em purê de batata em duas proporções diferentes, onde não foi observado alteração

na produção de gás entre os frascos. Na quinta digestão, utilizou-se novamente purê de batata, os frascos adaptados foram substituídos por frascos específicos para coleta de gases.

Para o sexto teste em diante, coletou-se lodo da lagoa anaeróbia da própria indústria para utilização como inóculo, em substituição da água residuária utilizada nos testes anteriores. No Quadro 3 são apresentados os principais resultados, parâmetros e condições de processo utilizadas nos testes preliminares e também os aprendizados obtidos de um teste para outro.

Quadro 3: Resultados obtidos nos testes preliminares

(continua)

Teste	Resíduo industrial	Parâmetros iniciais	Condições de processos	Resultados
1	Purê de batata inglesa	8,75 °Brix, pH 5,75	5 °Brix, água residuária como inóculo, provetas de vidro 250 ml, temperatura ambiente	Houve produção de gás e redução de sólidos para 3,8 °Brix, redução de pH e identificados e sanados vazamentos
2	Purê de batata salsa	8,0 °Brix, pH 4,97, 10,3% de ST	3 e 5 °Brix, água residuária como inoculo, provetas de 1000 ml, temperatura ambiente	Houve produção de gás e redução de sólidos para 2,8 e 4,2 °Brix e de ST para 6,0 e 4,4%, redução de pH e identificados e sanados vazamentos
3	Batata inteira	17,66% de ST	50 e 100 g/L de batata moída, diluição com água residuária, temperatura do banho-maria em 37 °C	Houve produção de até 5 litros de gás, redução de ST para 10,8%, porém não houve diferenças significativas entre água destilada e água residuária, identificados e sanados vazamentos
4	Batatas inglesa, salsa e doce, mandioca, beterraba, feijão e milho	15 e 16,4% de ST	Proporção de 66 e 75% de purê de batata inglesa, solicitou-se coleta de água na estação de tratamento de efluentes industriais	Redução de ST para 11 e 13%, produção pequena de gás, mas de maneira uniforme, detectado acidificação e alto teor inicial de sólidos
5	Purê de batata doce	14,4% de ST	9,5% de ST, substituição de tampas dos frascos para tampas específicas para trabalhos com gás	Não houve produção significativa de gás, possível interferência do clima (período de inverno) tanto no laboratório quanto na coletada na indústria
6	Purê de batata inglesa	10,8% de ST	Utilização de lodo da lagoa anaeróbia da indústria	Redução de ST para 6,8%, verificado aumento do pH do meio em relação a água, porém ocorreu acidificação

Quadro 4: Resultados obtidos nos testes preliminares

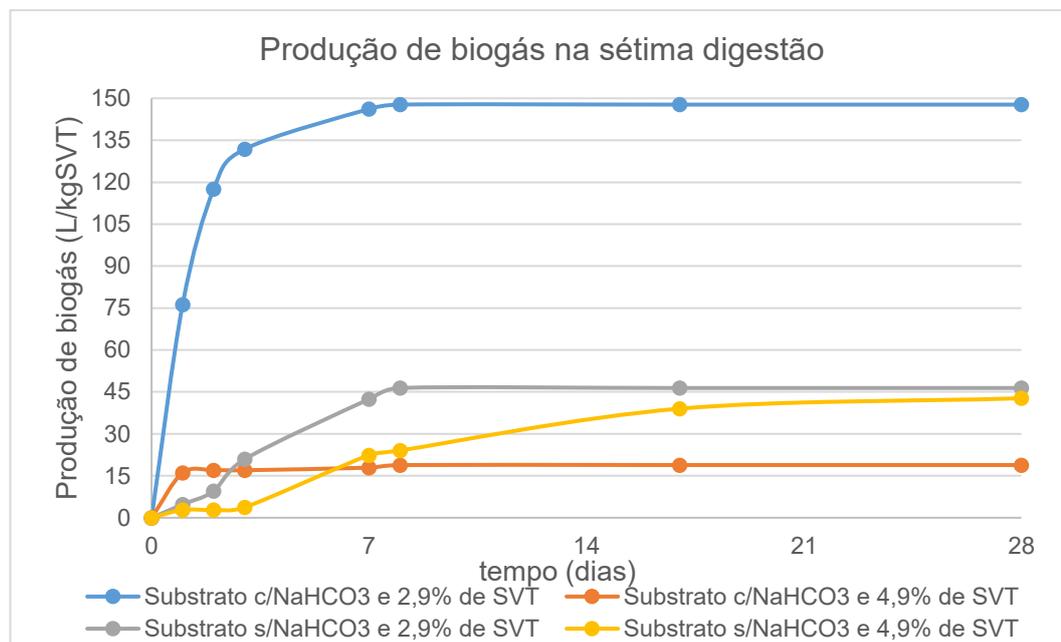
(conclusão)

7	Purê de batata inglesa	10,8% e 7,05% de SVT, pH 7,50	Lodo da lagoa anaeróbia com SVT de 0,87% para diluição do teor de SVT do substrato para 2,9 e 4,9%, digestão comparando frascos com e sem adição de 0,5g de bicarbonato de sódio em pó	Melhores resultados até aqui com 147,75 L _{biogás} /kg _{SVT} , identificados em teor mais baixo de SVT e presença de bicarbonato de sódio, porém mesmo assim houve acidificação
8	Purê de batata inglesa	8,59% de SVT, pH 7,50	Redução para 3,09% de SVT e adição de bicarbonato de sódio em solução, a partir deste teste os frascos foram mantidos ao abrigo da luz	Produção baixa de gás, com apenas 54,7 L _{biogás} /kg _{SVT}
9	Purê de batata inglesa	6,75% de SVT	Diluição com bicarbonato de sódio em solução para correção de pH, lodo apresentou características diferentes, com 9,3% de SVT	Resultados não considerados, lodo coletado na indústria não tinha características da lagoa anaeróbia
10	Purê de batata doce	14,27% de SVT, pH 7,50	Lodo da lagoa anaeróbia com 1,85% de SVT mantido na temperatura inicial de digestão por 24 horas antes do início do teste, realizado diluição com lodo e correção de pH com solução de bicarbonato até 5,1% de SVT	Teste com adição de substrato no lodo obtendo-se em média 29,41 L _{biogás} /g _{SVT} e para frasco sem substrato obtendo-se 83,35 L _{biogás} /g _{SVT} , realizado DQO porém sem alterações significativas na entrada e saída, observado que o frasco sem substrato não houve acidificação

Fonte: Elaboração própria.

A partir do sétimo teste as condições foram otimizadas e os resultados obtidos são apresentados de forma mais conclusivas.

O inóculo aumentou o pH do meio, porém este não permaneceu constante até o final da digestão. Desta forma, para sétima digestão adicionou-se 0,5 g/L de bicarbonato de sódio em dois frascos, aumentando a alcalinidade do meio, em dois teores de SVT diferentes: 2,9% e 4,9%. Para os frascos com a adição de bicarbonato, obteve-se um resultado de 147,75 L_{biogás}/kg_{SVT}, enquanto que sem a adição do alcalinizante a produção foi de 46,3 L_{biogás}/kg_{SVT}. A produção de biogás em L_{biogás}/kg_{SVT} pode ser observado no Gráfico 3.

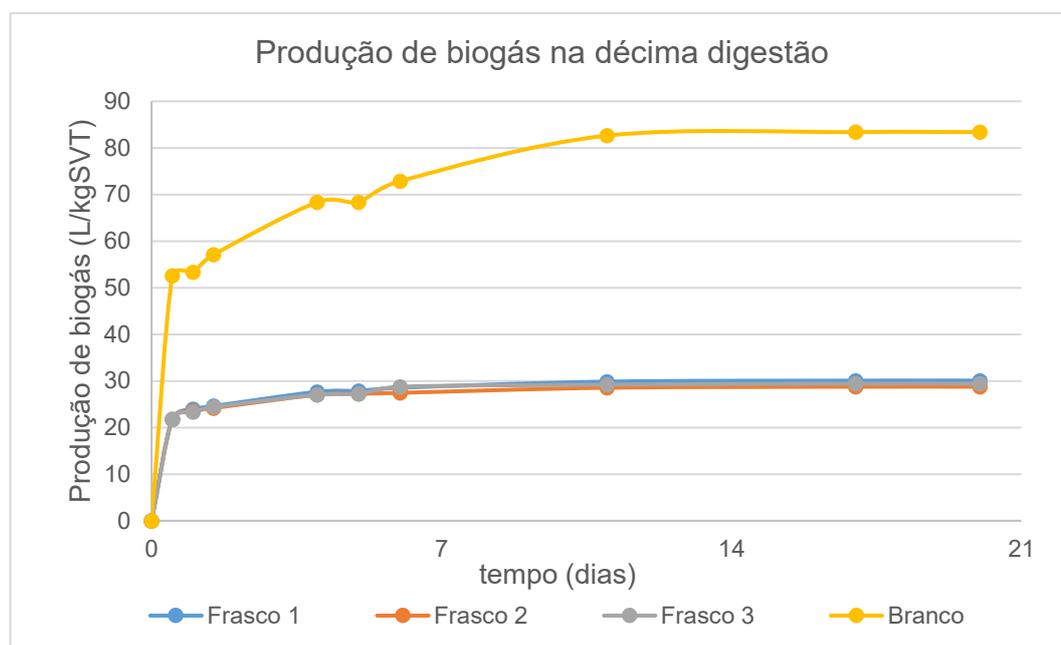
Gráfico 3: Curva de produção de biogás na sétima digestão

Fonte: autoria própria.

No Gráfico 3 observa-se que a presença de bicarbonato de sódio foi benéfica para a produção de biogás, assim como o teor de SVT em 2,9%. O sistema foi mantido por 28 dias, porém a produção de biogás cessou entre o sétimo e o oitavo dia, indicando a acidificação dos reatores, mesmo na presença do alcalinizante. O acréscimo na curva do frasco sem bicarbonato de sódio e 4,9% de SVT pode ser originado em fatores externos a biodigestão.

A oitava digestão ocorreu novamente com a presença de bicarbonato e 3,76% de SVT em triplicata, porém obteve-se um valor máximo de 54,6 L_{biogás}/kg_{SVT}. O nono teste não apresentou resultados significativos, devido ao lodo utilizado não ter sido coletado na lagoa anaeróbia.

No décimo teste, utilizou-se resíduo de batata doce como substrato. O lodo foi aclimatizado na temperatura de processo por 24 horas antes da incubação. Um frasco, denominado Branco, foi inoculado apenas com lodo anaeróbio, os frascos com substrato foram inoculados em triplicata. Os frascos com substrato apresentaram um teor de SVT médio de 5,1% e o Branco com 1,4%. Adicionou-se bicarbonato de sódio em todos os frascos. O Gráfico 4 apresenta a produção de biogás no décimo teste.

Gráfico 4: Curva de produção de biogás na décima digestão.

Fonte: autoria própria.

A produção média de biogás foi de $29,41 \text{ L}_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ nos frascos inoculados com o resíduo industrial e $83,35 \text{ L}_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ no frasco branco. Observou-se acidificação nos frascos com substrato e a manutenção do pH no branco. Desta forma, verificou-se que o teor de SVT ideal está abaixo do que vinha sendo realizado. Após o décimo dia, não houve produção significativa de biogás. Realizou-se também a análise de DQO do frasco inoculado, obtendo-se um valor de entrada de $5273 \pm 587 \text{ mg}_{\text{O}_2}/\text{L}$ para os frascos com substrato e $446 \text{ mg}_{\text{O}_2}/\text{L}$ para o frasco Branco, porém sem queda significativa após 21 dias.

De forma geral, os resultados dos testes preliminares não foram expressivos ao se comparar com a literatura, porém foram importantes para conhecer aspectos dos diferentes resíduos estudados e também para melhorar a estrutura do laboratório nessa linha de pesquisa e agregar conhecimentos para estudos futuros. Partiu-se então para a análise de Potencial Bioquímico de Metano seguindo a metodologia internacional VDI 4630, apresentada no próximo capítulo.

5.3 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS

Inicialmente, determinou-se o teor de ST e SVT das amostras. Utilizando frascos com 200 ml de inóculo, adicionou-se a massa necessária de substrato para que a razão entre o teor de SVT do substrato e do inóculo fosse menor que 0,5, como pode ser observado na Tabela 5.

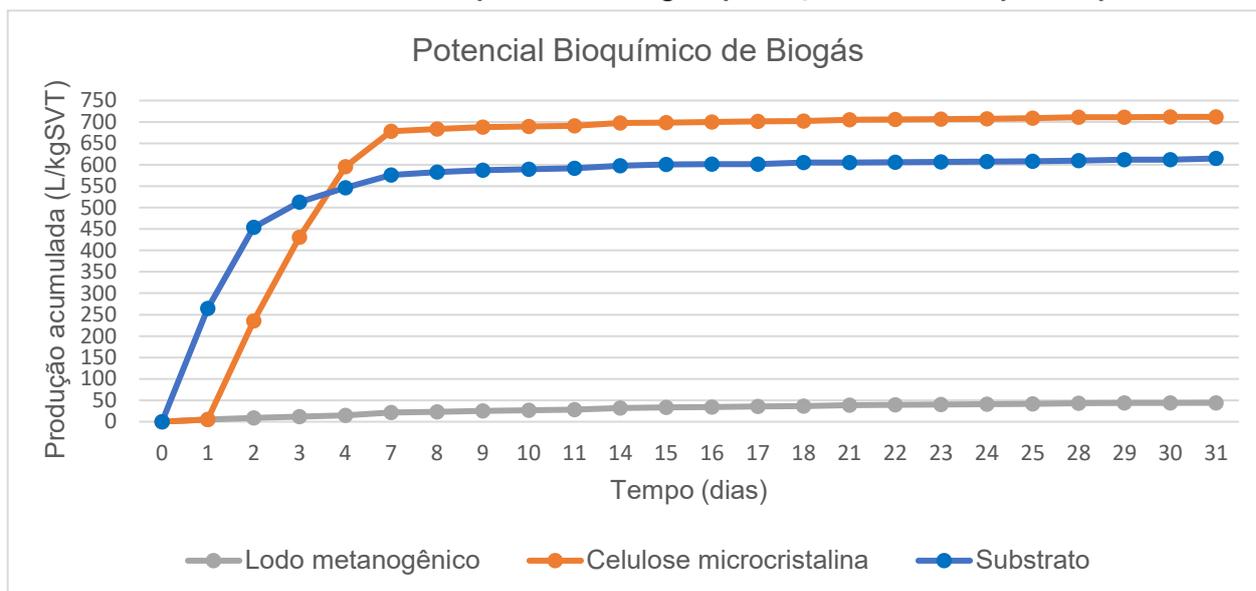
Tabela 5: Variáveis de entrada no ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás

	Sólidos Totais	Sólidos Voláteis Totais	Massa adicionada de inóculo (g)	Massa adicionada de substrato (g)	Razão entre SVT do substrato e inóculo	pH inicial
Inóculo	3,60%	2,30%	204,82	-	-	7,30
Substrato	9,33%	8,68%	205,71	15,39	0,282	7,33
Celulose Microcristalina	95,99%	96,00%	204,03	1,46	0,299	7,30

Fonte: Autoria própria.

A relação entre o teor de SVT do substrato e do inóculo em laboratório foi de 0,282, sendo assim a massa de inóculo adicionada foi 13,36 vezes a massa de substrato. Utilizou-se uma relação baixa para efeitos de praticidade das atividades no laboratório. Para o cálculos em escala real, pode-se trabalhar com uma relação até 0,50, onde a massa de inóculo é 7,57 a massa de substrato.

O Gráfico 5 mostra a curva média em triplicata de volume normalizado de biogás em $L_{\text{biogás}}/kg_{\text{SVT}}$ por tempo de processo para o substrato, lodo e celulose microcristalina.

Gráfico 5: Ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás: produção acumulada por tempo

Fonte: autoria própria.

No Gráfico 5 é possível observar que a produção acumulada de biogás para o substrato analisado atingiu um valor de 615 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ em 31 dias, sendo que no décimo quinto dia a produção acumulada atingiu 600 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$. Sendo assim, os resultados em laboratório indicam que o tempo de residência de 15 dias é o necessário para atingir 97,5% da produção de biogás.

A celulose microcristalina apresentou uma média de 712 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$, valor dentro do padrão esperado pela VDI 4630 (2016), enquanto que o inóculo atingiu 34 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ em 15 dias e 44 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ no último dia do experimento. Desta forma, o inóculo utilizado apresentou as condições necessárias para validar o teste com o substrato.

A composição do biogás produzido foi analisada por analisador portátil, obtendo-se um valor médio de 50,89% de metano durante todo o processo. Desta forma, o Potencial Bioquímico de Biogás (PBB) obtido foi de 615,0 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{SVT}}$ e o Potencial Bioquímico de Metano foi de 313,0 $L_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{SVT}}$, resultado dentro da média apresentada na literatura para batata inglesa no Quadro 1 ($349,5 \pm 74,0 L_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{SVT}}$).

5.4 RELAÇÃO CARBONO/NITROGÊNIO

A caracterização da biomassa é dificultada por esta apresentar características variáveis, a depender de condições de processamento industrial e sazonalidade da produção. Desta forma, realizou-se análise de Matéria Orgânica (MO), Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) em amostras de purê de batata inglesa, por este representar o maior volume mensal de resíduos. As análises foram realizadas em base seca. Os resultados obtidos foram 92,11% de MO, 55,27% de COT e 1,32% de NTK, implicando em uma relação C:N de 42,04, o que representa em torno de 40% de Carbono em excesso na relação C:N ideal para Karlsson et al (2014).

5.5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Relacionando os dados de produção mensal de resíduos pela indústria e as análises realizadas em laboratório, é possível estimar a produção mensal de biogás e os custos envolvidos na aquisição de um biodigestor e a melhor alternativa de aproveitamento da energia no ponto de vista financeiro.

Será considerado um tempo de residência do substrato no biodigestor de 15 dias, pois neste período observou-se a produção acumulada de 97,5% do total de biogás produzido em 31 dias. Será considerado também uma relação de 0,5 entre o teor de SVT de substrato e inóculo, reduzindo assim o volume necessário de inóculo adicionado e por consequência o custo com a construção do biodigestor.

O potencial de produção de biogás e metano produzidos a partir dos dados de produção mensal de resíduos de 93 toneladas (Tabela 4) e ensaios em laboratório (Tabela 5 e Gráfico 5) podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados do ensaio de Potencial Bioquímico de Biogás

	Potencial Bioquímico de Biogás (m ³ /T _{SVT})	Massa de substrato adicionada em 15 dias (T)	Teor de SVT	Volume de biogás produzido (m ³)	Volume mensal de biogás (m ³ /mês)	Volume mensal de metano (m ³ /mês)
Substrato	600	46,5	8,68%	2421,7	5391,8	2743,9
Inóculo	34	350,6	2,30%	274,2		

Fonte: autoria própria

A partir do volume mensal de resíduos e inóculo necessário e tempo de residência, pode-se calcular o volume do biodigestor necessário para o estudo de caso. Como o inóculo estará em meio líquido, uma tonelada da carga do biodigestor tem volume aproximado de um metro cúbico.

De acordo com a Tabela 6, a alimentação máxima será de 350,6 toneladas de inóculo e 46,5 toneladas de substrato, portanto, o volume do biodigestor deverá ser de pelo menos 397,1 m³.

O volume do biodigestor corresponde ao local destinado para a biodigestão ocorrer em fase líquida. O biogás produzido pode ser armazenado na cúpula do biodigestor, em uma manta de lona acoplada. Desta forma, um reator com volume de 400 m³, será suficiente para o tratamento de 93 toneladas mensais de resíduos orgânicos com 15 dias de tempo de residência, gerando um volume mensal de 5391,8 m³ de biogás ou 2743,9 m³ de metano.

Entre os vários modelos disponíveis, o biodigestor pode ser construído nos modelos lagoa coberta com cúpula para armazenamento do biogás ou então em uma estrutura circular com agitação.

Considerando a produção mensal de biogás, biometano, a conversão dos tipos convencionais de energia descritos na Tabela 6 e o preço médio da energia no estado do Paraná em 2019 relatado por Souza et al (2019), é possível estimar a receita obtida pela substituição da energia convencional pelo biogás e seus subprodutos. Os cálculos estão descritos na Tabela 7:

Tabela 7: Estimativa da receita mensal na substituição de energias convencionais por biogás

Energia convencional	Preço	Equivalência a biometano	Receita mensal ¹
Diesel	3,30 R\$/L	0,553	R\$5.681,10
GLP	6,27 R\$/kg	0,454	R\$8.484,49
GNV	2,90 R\$/m ³	1	R\$8.631,07
Energia Elétrica	250 R\$/MWh	1,428	R\$1.908,02
Vapor	65 R\$/kg	-	-
CO ₂	0,50 R\$/m ³	-	-

Fonte: Autoria própria, adaptado de Souza et al (2019).

¹Considerando a soma dos subprodutos CO₂ e vapor (cogeração com energia elétrica)

De acordo com a Tabela 7, com a utilização do biometano como substituto do GNV e GLP é possível obter receitas maiores do que a utilização como substituto a energia elétrica e diesel. Estes também são os tipos de energia com menor custo de adaptação (Quadro 2) pois podem substituir combustíveis gasosos com a simples queima direta.

O custo com a construção do biodigestor irá depender da tecnologia a ser utilizada. Martins e Oliveira (2011) estimaram em R\$52.000,00 o custo com a construção de um biodigestor com volume de 625 m³. Um biodigestor modular comercial de 20 m³, já equipado com purificação e refino possui um custo de R\$13.560,00 (orçado em uma empresa especializada no estado do Paraná em agosto de 2019) e pode ser utilizado como uma primeira etapa para a implantação de um biodigestor maior.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processamento industrial de alimentos gera uma grande quantidade de resíduos orgânicos, acarretando em um passivo ambiental que deve ser enquadrado na legislação vigente, tornando-se um custo considerável na cadeia produtiva.

A digestão anaeróbia pode fazer do problema uma solução ambiental com produção de biogás como energia limpa e renovável e biofertilizante, produtos que podem ser utilizados na própria cadeia produtiva.

A literatura apresenta o potencial teórico de produção de metano para os resíduos agroindustriais semelhantes ao deste estudo. A análise de potencial metanogênico em laboratório deve ser realizada para verificar a capacidade de biodigestão do resíduo nas características intrínsecas de cada caso.

A biodigestão é uma técnica amplamente difundida no esgotamento sanitário e agropecuária há anos e vem ganhando espaço também no tratamento de resíduos sólidos urbanos e da agroindústria, com reatores e equipamentos cada vez mais adaptados a produção industrial.

A viabilidade técnica e econômica para a escolha deste tratamento requer condições favoráveis em termos de legislação vigente, o qual tem avançado no sentido de exigir uma adequação ambiental e oportunizar a escolha entre os vários tipos de utilização da energia gerada na biodigestão, e estrutura física, com a presença de uma cadeia produtiva específica para a produção de biogás, como a presença de fornecedores de equipamentos e consumidores de energia e biofertilizante, interna ou externamente.

Tais condições viabilizarão a substituição dos métodos convencionais de produção e consumo de energia fóssil para métodos alternativos e renováveis, reduzindo a dependência de fontes externas de energia e o impacto ambiental causado por elas.

Com base na teoria, na caracterização e nos testes preliminares, foi possível observar aspectos semelhantes entre os diferentes resíduos vegetais provenientes da linha de produção, e assim, a produção de biogás não ficaria dependente da sazonalidade da indústria.

O ensaio de Potencial Bioquímico de Metano para o resíduo do processamento de batatas apresentou um resultado dentro do esperado, quando

comparado com a literatura. A importância do ensaio para o resíduo específico se dá pelo fato de haver características intrínsecas ao processo que podem indicar alterações no resíduo, além de características morfológicas como a proporção caca/polpa resultante dos métodos utilizados no processamento vegetal.

O resultado obtido em laboratório foi utilizado como parâmetro inicial para determinar a produção mensal de biogás e o volume do reator necessário para o tratamento, porém podem haver divergências ao expandir para a escala real.

A aplicação do biogás como substituto dos combustíveis gasosos GLP e GNV apresenta o menor custo de implantação e maior facilidade de adaptações da estrutura atual da indústria. Os subprodutos da biodigestão, biofertilizante, e do refino, gás carbônico, também são receitas a serem consideradas.

Portanto, o estudo demonstrou ser possível obter recursos com a biodigestão de resíduos do processamento de vegetais. A construção de um biodigestor próprio deve ser considerada, desde que haja demanda da energia gerada pelo biogás. Inicialmente, pode-se optar pela aquisição de um biodigestor em escala menor, para que a adaptação da utilização do biogás e a operação sejam facilitadas. Outra possibilidade é a prospecção de parceiros produtores de biogás próximos à unidade, onde possa haver um compartilhamento entre biomassa e produtos da biodigestão, gerando benefícios a todos os envolvidos na cadeia e também ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALAVIJEH, M. K.; YAHHMAEI, S. Biochemical production of bioenergy from agricultural crops and residue in Iran. **Waste Management**, v. 52, p. 375-394, 2016.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamentos e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.
- APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. American Public Health Association, Washington, 2005.
- AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, M. L. F.; MONTEGGIA, L. O. Metodologias para determinação da atividade metanogênicas específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192-201, 2007.
- BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I.; KALYUZHNYI, S. V.; PAVLOSTATHIS, S. G.; ROZZI, A.; SANDERS, W. T. M.; SIEGRIST, H.; VAVILIN, V. A. Anaerobic Digestion Model No 1. **IWA Scientific and Technical Report**, n. 13, Londres, 2002.
- BAYR, S.; OJANPERÄ, M.; KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Long-term thermophilic mono-digestion of rendering wastes and co-digestion with potato pulp. **Waste Management**, v. 34, p. 1853-1859, 2014.
- BOZYM, M.; FLORCZAK, I.; ZDANOWSKA, P.; WOJDALSKI, J.; KLIMKIEWICZ, M. An analysis of metal concentrations in food wastes for biogas production. **Renewable Energy**, v. 77, p. 467-472, 2015.
- BRASIL. **Energia no mundo 2015-2016**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017.
- BRASIL. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2015.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 03 ago. 2010.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizante e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério de Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2017**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

BRASIL. **Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis nº 8 de 30 de janeiro de 2015**. Estabelece as especificações do Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais. Diário Oficial da União. Brasília, 02 fev. 2015.

BRASIL. **Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis nº 685 de 29 de junho de 2017**. Estabelece as regras para aprovação do controle de qualidade e especificações do biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Diário Oficial da União. Brasília, 30 jun. 2017.

CARAPINHA, L. C. M. **Efeito de alguns pré-tratamentos na digestão anaeróbia mesofílica de resíduos de casca de batata**. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis). UNL: Lisboa, 2012.

CARDOSO, A. D.; ALVARENGA, M. A. R.; DUTRA, F. V.; MELO, T. L. E VIANA, A. E. S. Características físico-químicas de batata em função de doses e fracionamentos de nitrogênio e potássio. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3. Lisboa, 2017.

CIBIOGÁS-ER (Centro Internacional de Energias Renováveis). **Relatório do Grupo Ad Hoc de Biocombustíveis do Mercosul (GAHB) sobre Biogás e Biometano**. Foz do Iguaçu, 2016.

CIBIOGÁS-ER (Centro Internacional de Energias Renováveis). **Conceitos básicos e digestão anaeróbia**. Curso de Biogás: fundamentos e aplicações do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018a.

CIBILOGÁS-ER (Centro Internacional de Energias Renováveis). **Características e aplicações do biogás e do digestato**. Curso de Biogás: fundamentos e aplicações do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018b.

CIBILOGÁS-ER (Centro Internacional de Energias Renováveis). **Operação e manutenção de plantas de biogás, arranjos de viabilidade econômica e panorama do biogás**. Curso de Biogás: fundamentos e aplicações do CIBiogás. Foz do Iguaçu, 2018c.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

COLDBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UNIOESTE: Cascavel, 2006.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema de produção de batata**. Disponível em <<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/132923/1/sistema-de-producao-da-batata.pdf>>> Acessos em 03/08/2018.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

ÉPOCA Negócios. **Brasil começará a produzir energia a partir de lixo e esgoto**. Disponível em: <<<https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2019/03/brasil-comecara-produzir-energia-partir-de-lixo-e-esgoto.html>>> Acessos em 05/05/2019.

FELLOWS, P. J.; NITZKE, J. A. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2018.

GE, X.; MATSUMOTO, T.; KEITH, L.; LI, Y. Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 38-44, 2014.

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, p. 1111-1116, 1987.

HILLION, M.; MOSCOVIZ, R.; TRABLY, E.; LEBLANC, Y.; BERNET, N.; TORRIJOS, M.; ESCUDIÉ, R. Co-ensiling as a new technique for long-term storage of agro-industrial waste with low sugar content prior to anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 71, p. 147-155, 2018.

HISING, E. **Paraná produz menos de 1% do potencial energético em biogás, diz instituto**. Disponível em: <<<https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/parana-produz-menos-de-1-do-potencial-energetico-em-biogas-diz-instituto.ghtml>>> Acessos em 08/05/2019.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LPSA**. Disponível em: <<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>>> Acessos em 10/06/2019.

IPARDES (Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social). **Base de Dados do Estado**. Disponível em: <<<http://www.ipardes.gov.br/imp/index.php>>> Acessos em 15/05/2019.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual Básico do Biogás**. 1. ed. Lajeado: UNIVATES, 2014. 70 p.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. EMBRAPA: Piracicaba, 1998.

KOÇAR, G.; CIVAŞ, N. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 900-916, 2013.

KONRAD, O.; HASAN, C.; HICKMANN, E. V.; MARDER, M.; GUERINI FILHO, M.; SILVA, M. C. A. **Produção de biogás a partir de biomassas residuais provenientes do setor agroindustrial**. Convênio SDECT DCIT n. 57/2016. Lajeado, UNIVATES, 2018.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, n. 3, p. 28-35, 2006.

LIANG, S.; MCDONALD, A. G. Anaerobic digestion of pre-fermented potato peel wastes for methane production. **Waste Management**, v. 46, p. 197-200, 2015.

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. Análise econômica da geração de energia elétrica a partir de biogás na suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 477-486, 2011.

MITO, J. Y. L.; KERKHOFF, S.; SILVA, J. L. G.; VENDRAME, M. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Concórdia (SC): Embrapa Suínos e Aves., 2018.

MU, H.; ZHAO, C.; ZHAO, Y.; LI, Y.; HUA, D.; ZHANG, X.; XU, H., Enhanced methane Production by semi-continuous mesophilic co-digestion of potato waste and cabbage waste: performance and microbial characteristics analysis. **Bioresource Technology**, v. 236, p. 68-76, 2017.

NEPA. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. 4. ed. Campinas: NEPA; UNICAMP, 2011. 161 p.

OKUDOH, V.; TROIS, C.; WORKNEH, T.; SCHMIDT, S. The potential of cassava biomass and applicable technologies for sustainable biogas production in South Africa: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1035-1052, 2014.

PARANÁ. **Lei Estadual nº 19.500 de 21 de maio de 2018**. Dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências. Diário Oficial do Estado do Paraná. Curitiba, 22 mai. 2018.

RAVI, P. P.; LINDNER, J.; OECHSNER, H.; LEMMER, A. Effects of target pH-value on organic acids and methane production in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 96-102, 2018.

RIBEIRO, M. F. S.; RAIHER, A. P. Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná. **Energy Policy**, v. 60, p. 208-216, 2013.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

SEAB. Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento do Paraná. **Olericultura: Análise da Conjuntura Agropecuária**. Curitiba: SEAB, 2017.

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). **Emissões GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris**. Observatório do Clima: SEEG, 2018.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná**. Curitiba: Senai/PR, 2016.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução**. 1. ed. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, E. **Trator movido a biometano deve chegar ao mercado em três anos**.

Disponível em:

<<<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Feiras/noticia/2018/04/trator-movido-biometano-deve-chegar-ao-mercado-em-tres-anos.html>>> Acesso em 05/05/2019.

SOUZA, A. L. V.; CANDAL, A. V.; CRUZ, C. B.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, W. R. A. R. Substituição do diesel por biogás – análise de viabilidade da aplicação de energia. **Paraná Cooperativo Técnico e Científico**, v. 14, ed. esp. 20, p. 06-25, 2019.

SOUZA, S. N. M. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Cascavel: Ed. Unioeste, 2016.

SOUZA, M. A.; DETMANN, E.; FRANCO, M. O.; BATISTA, E. D.; ROCHA, G. C.; VALADARES FILHO, S. C.; SALIBA, E. O. S. Estudo colaborativo para avaliação dos teores de proteína bruta em alimentos utilizando o método de Kjeldhal. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 17, n. 4, p. 696-709, 2016.

STILPEN, M. R.; STILPEN, D. V. S.; MARIANI, L. F. Análise do Programa RenovaBio no âmbito do setor de biogás e biometano do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. 24, n. 4, 2018.

VDI. VDI 4630. **Fermentation of organic materials**: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros. Düsseldorf, 2016.

WU, D. Recycle technology for potato peel waste processing: a review. **Procedia Environmental Sciences**, v. 31, p. 103-107, 2016.

ZHANG, Q.; HE, J.; TIAN, M.; MAO, Z.; TANG, L.; ZHANG, J.; ZHANG, H. Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 8899-8906, 2011.

ZIEMNSKI, K.; ROMANOWSKA, I.; KOWALSKA-WENTEL, M.; CYRAN, M. Effects of hydrothermal pretreatment of sugar beet pulp for methane production. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 187-193, 2014.