

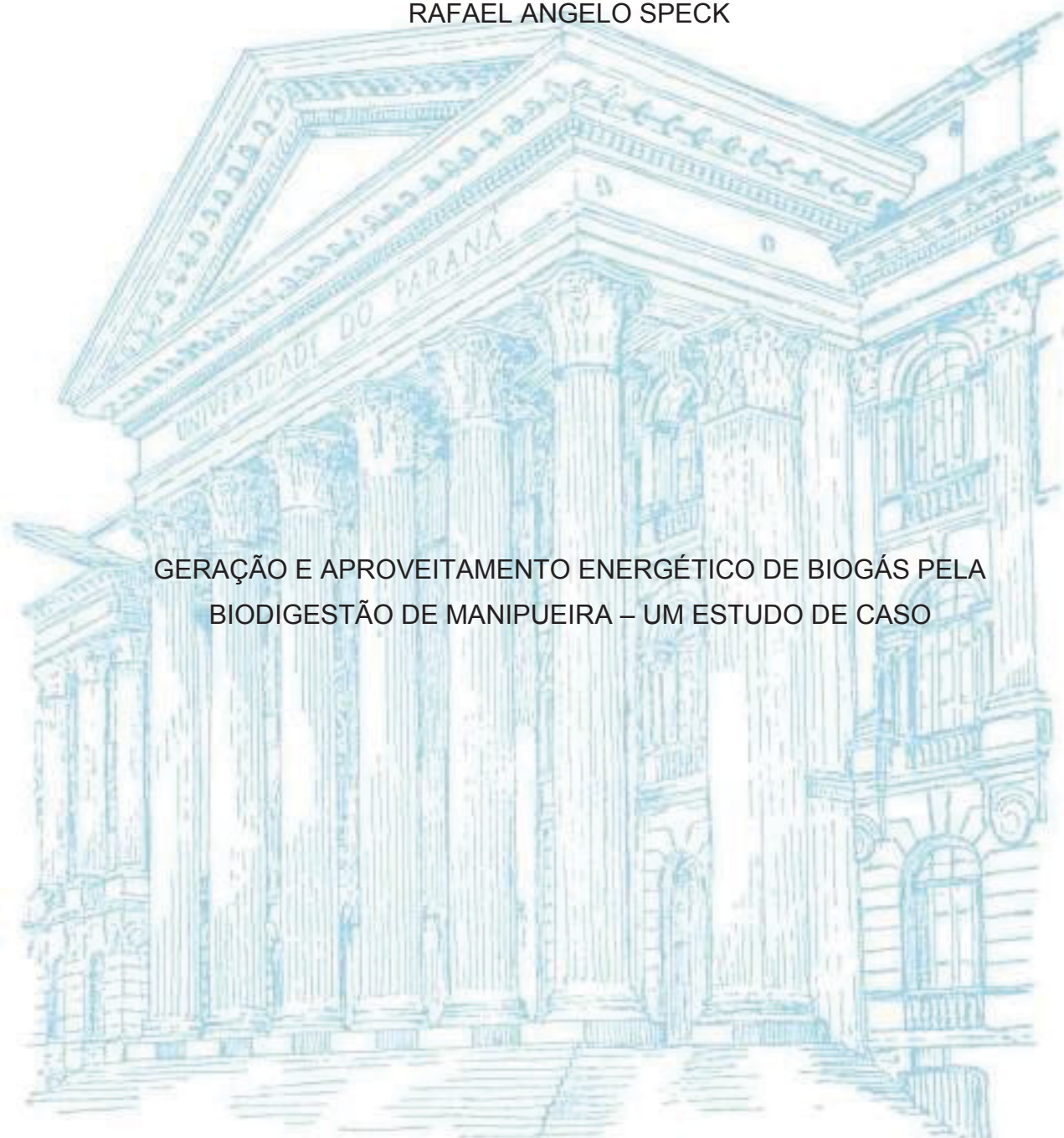
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL ANGELO SPECK

GERAÇÃO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS PELA
BIODIGESTÃO DE MANIPUEIRA – UM ESTUDO DE CASO

PALOTINA

2019



RAFAEL ANGELO SPECK

GERAÇÃO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS PELA
BIODIGESTÃO DE MANIPUEIRA – UM ESTUDO DE CASO

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre, ao Programa
de Pós-Graduação em Tecnologia de Bioprodutos
Agroindustriais, Setor de Palotina, Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken.

PALOTINA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S741 Speck, Rafael Angelo
Desempenho da geração e aproveitamento energético de
biogás pela biodigestão de manipuera – estudo de caso / Rafael
Angelo Speck – Palotina,
2019.
67f.

Orientador: Joel Gustavo Teleken
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, Programa de Pós-graduação em Bioprodutos
Agroindustriais.

1. Digestão anaeróbia. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Bio-
energia. 4. Metano. I. Teleken, Joel Gustavo. II. Universidade
Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620.91



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOTECNOLOGIA -
40001016083P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em BIOTECNOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RAFAEL ANGELO SPECK** intitulada: **GERAÇÃO E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS PELA BIODIGESTÃO DE MANIPUEIRA - UM ESTUDO DE CASO**, sob orientação do Prof. Dr. JOEL GUSTAVO TELEKEN, que após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

PALOTINA, 30 de Agosto de 2019.


JOEL GUSTAVO TELEKEN
Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)


JHONY TIAGO TELEKEN
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTO

À Deus, por me permitir seguir este caminho e me proteger em todos os momentos.

À UFPR – Palotina, por disponibilizar estrutura para realização do trabalho.

À Horizonte Amidos, pela cordialidade e todas as informações compartilhadas que possibilitaram acontecer o projeto.

Ao programa de pós-graduação em Biotecnologia e aos professores por todo ensinamento.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Dr. Joel Gustavo Teleken pela orientação, por toda atenção e ensinamentos que me foram disponibilizados, pela amizade e confiança em mim depositada.

Agradeço imensamente ao meu amigo Thompson Ricardo Weiser Meier, sempre tão companheiro e compreensivo nas análises laboratoriais, por toda ajuda e amizade de sempre.

Ao amigo Paulo André Cremonez que contribuiu com revisões e formatações.

Em especial aos meus pais, Adelar (*in memoriam*) e Lori, que representam um grande exemplo de vida e superação, meus irmãos Miguel e Raquel, que sempre me apoiam, aos meus filhos, Arthur e Benício, minha razão de viver e a minha esposa Maristela. Obrigado por me apoiarem em tantos momentos difíceis, compreenderam minha ausência e me incentivaram nessa dura caminhada.

A todos que de alguma maneira contribuíram, muito obrigado.

RESUMO

As instalações de biodigestores em lagoas de estabilização de feculárias estão focadas na perspectiva de uma alternativa para o tratamento de resíduos. Essa tecnologia contribui expressivamente na obtenção de energia renovável, podendo ser utilizada como fonte de energia térmica ou elétrica, além de ser uma importante ferramenta na gestão agroindustrial voltada para a prática da geração distribuída. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de mandioca, sendo essa uma cultura cultivada em todos os estados brasileiros, destacando-se pela sua rusticidade e capacidade de adaptação sob condições desfavoráveis de clima e solo, sendo utilizada tanto para o consumo *in natura* ou como matéria-prima para a agroindústria na produção de farinha ou fécula de mandioca. Em uma das primeiras etapas, na produção de fécula de mandioca são feitos processos de lavagem, descascamento e posterior ralação e prensagem da massa de mandioca. Essas etapas do processo produtivo de derivados geram grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos com elevado potencial para geração de energia. Dentre os resíduos gerados no processo produtivo destaca-se a manipueira, que é o resíduo mais problemático por possuir elevada carga de poluente e efeito tóxico, gerando gases precursores do efeito estufa, como o metano (CH₄) e o dióxido de carbônico (CO₂). Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo de caso, descrevendo e avaliando o potencial de desempenho da geração e aproveitamento energético do processo de biodigestão anaeróbia, proveniente de águas residuárias de feculárias. Foram coletadas amostras de efluente e biogás de uma fecularia para acompanhar o tratamento dos resíduos e caracterização do biogás produzido por um período de sete meses. Também foram obtidos dados referentes à quantidade e custo de utilização do cavaco como combustível na indústria (neste mesmo período) para então mensurar a economia e viabilidade da utilização do biogás na planta. Em relação aos tratamentos biológicos dos resíduos ocorreu uma remoção média de sólidos voláteis nos meses avaliados de 71,42 %, remoção da DQO apresentou média de 91,52 % e verificou-se que o biogás produzido no período pode gerar 9.169.578,90 (kcal), o que representou 8,99% de receita sobre o valor gasto na compra de cavaco no período avaliado. Conclui-se que a utilização da biodigestão anaeróbia se mostra viável e eficiente no tratamento de resíduos da produção de fécula de mandioca, além de agregar valor ao processo pela produção de biogás com elevado poder energético.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Resíduos agroindustriais. Bioenergia. Metano.

ABSTRACT

The biogas facilities in stabilization ponds of cassava industries are focused the prospect of an alternative for the treatment of waste. This technology contributes significantly in achieving renewable energy, can be used as a source of thermal or electrical energy, in addition to being an important tool in agribusiness management focused on the practice of distributed generation. The Brazil is one of the largest producers of cassava, that is cultivated in all Brazilian states, especially by your rusticity and adaptability under unfavorable conditions of climate and soil, being used both for in natura consumption or as raw material for agroindustry in the production of cassava flour or starch. In one of the first stages, in the production of cassava starch, are made processes of washing, peeling and subsequent grating and pressing of the cassava paste. These stages of the production process of derivatives generate large amounts of solid and liquid waste with high potential for power generation. Among the residues generated in the production process stands out the cassava wastewater, that is the most problematic residue because it has a high pollutant load and toxic effect, generating several gas precursors of the greenhouse effect, as methane (CH₄) and carbonic dioxide (CO₂). In this sense, the present work aimed to carry out a case study, describing and evaluating the performance potential of the generation and energy utilization of the anaerobic biogas production process, from wastewater of cassava industries. Samples of effluent and biogas from a cassava starch production industry were collected in order to accompany the waste treatment and characterization of the biogas produced. Were also obtained data regarding the quantity and cost of use of wood chip as fuel in the industry to measure the economy and viability of using biogas in the plant. The average removal of volatile solids in the months evaluated was 71.42 %, values approximated to those described in literature. The removal of COD showed mean of 91.52 % and it was found that biogas produced in the period could generate 9,169,578.90 (kcal/m³), representing 8.99 % of revenues of amount spent on the purchase of the wood chip in the period evaluated. This research could conclude that the use of anaerobic digestion proved to be viable and efficient in the treatment of waste of production of cassava starch, besides add value to the process by the biogas production with high energy power, being used in the production line itself.

Keywords: Anaerobic digestion. Agro-industrial waste. Bioenergy. Methane.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DA RAIZ DE MANDIOCA NO BRASIL ..	19
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA POR REGIÃO DO PAÍS	20
FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE FÉCULA NOS PRINCIPAIS ESTADOS PRODUTORES DO BRASIL PARA O ANO DE 2015	22
FIGURA 4 - PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	24
FIGURA 5 - VISÃO AÉREA DA INDÚSTRIA ONDE A PESQUISA FOI DESENVOLVIDA	38
FIGURA 6 - AMIDONARIA AMIDOS HORIZONTE - LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	42
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FECULARIA HORIZONTE	43
FIGURA 8 - IMAGEM DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FECULARIA HORIZONTE	44
FIGURA 9 - (A) SÓLIDOS TOTAIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS); (B) SÓLIDOS TOTAIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS)	47
FIGURA 10 - (A) SÓLIDOS VOLÁTEIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS); (B) SÓLIDOS VOLÁTEIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS)	48
FIGURA 11 - (A) DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS); (B) DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSASIS)	50
FIGURA 12 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO NAS COLETAS MENSASIS....	51
FIGURA 13 - CROMATOGRAFIA GASOSA DA AMOSTRA DE BIOGÁS ANALISADA	53
FIGURA 14 - CONSUMO ENERGÉTICO DE CAVACO E BIOGÁS	54
FIGURA 15 - ECONOMIA DO CAVACO AVALIADA COM E SEM A UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS.....	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS COMPARADO AO DE OUTROS GASES.....	28
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS PROVENIENTE DE DIFERENTES RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	29
TABELA 3 - EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE BIOGÁS (60% DE METANO) E OUTROS COMBUSTÍVEIS.....	30
TABELA 4 - TRABALHOS QUE UTILIZARAM A MANIPUEIRA EM PROCESSOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	31
TABELA 5 - CONSUMO DE LENHA (MATERIAIS USADOS POR MASSA E VOLUME).....	34
TABELA 6 - ENERGIA DERIVADA DE LENHA CONSUMIDA POR EMPRESA POR UNIDADE DE PRODUÇÃO.....	35
TABELA 7 - ENERGIA DERIVADA DE LENHA ECONOMIZADA POR EMPRESA.....	35
TABELA 8 - ANÁLISES E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS UTILIZADOS NA PRESENTE PESQUISA.....	40
TABELA 9 - DESCRIÇÃO DOS DADOS DE PH PARA AMOSTRAS MENSAS COLETADAS.....	45
TABELA 10 - PRODUÇÃO DE METANO NO PRESENTE ESTUDO.....	52
TABELA 11 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO.....	53
TABELA 12 - DESCRIÇÃO DE CONSUMO CAVACO E BIOGÁS PARA O ANO DE BASE - 2018.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 13 - ESTIMATIVA DE CUSTO MÉDIO DE CAVACO POR TONELADA DE AMIDO.....	56
TABELA 14 - ECONOMIA GERADA A PARTIR DA COMPLEMENTAÇÃO COM BIOGAS PRODUZIDO.....	58
TABELA 15 - ORÇAMENTO DO SISTEMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	58
TABELA 16 - SALDO POR ANO.....	59
TABELA 17 - VALOR PRESENTE LÍQUIDO.....	60
TABELA 18 - INDICADORES DE RETORNO DAS EMPRESAS A, B, C E D.....	60

LISTA DE SIGLAS

ABAM	- Associação Brasileira dos Produtores de amido de mandioca
A1	- Amostra Um
A2	- Amostra Dois
A3	- Amostra Três
AI	- Alcalinidade Parcial
AP	- Alcalinidade Intermediária
AT	- Alcalinidade Total
AV	- Acidez Volátil
CEMA	- Conselho Estadual do Meio Ambiente
CEPEA	- Centro de Estudos Avançados em Economia e Aplicada
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	- Estações de Tratamento de Esgoto
FAO	- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GEE	- Gases do Efeito Estufa
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	- <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDL	- Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SEAB	- Secretaria de Estado de Agricultura e Abastecimento
SEMA	- Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SF	- Sólidos Fixos
ST	- Sólidos Totais
SV	- Sólidos Voláteis
STR	- Sistema de Tratamento de Resíduos
SV	- Sólidos Voláteis
TRH	- Tempo de Retenção Hidráulica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4 REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1 O CENÁRIO DA MANDIOCA NO BRASIL E NO MUNDO	18
4.2 MERCADO INTERNO DA MANDIOCA.....	19
4.3 PRODUÇÃO DE FÉCULA NO BRASIL.....	21
4.4 ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA	22
4.5 FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	23
4.6 FATORES DETERMINANTES PARA A ATIVIDADE ANAERÓBICA.....	25
4.6.1 Temperatura.....	26
4.6.2 pH.....	26
4.6.3 Composição e Concentração de Resíduos	27
4.6.4 Tempo de Retenção Hidráulica	27
4.7 PRODUTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	27
4.8 TRATAMENO DE MANIPUEIRA POR PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	31
4.9 CONSUMO DE LENHA/CAVACO NO PROCESSO PRODUTIVO DAS FECULARIAS.....	32
4.9.1 A utilização do biogás (estudo de múltiplos casos)	33
4.9.2 Relação do consumo energético entre a lenha e biogás	35
5 MATERIAL E MÉTODOS	37
5.1 ESTUDO DE CASO	37
5.2 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	37
5.3 COLETA DE DADOS PARA O DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	38
5.4 COLETA DAS AMOSTRAS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	39
5.5 PARÂMETROS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	39
5.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NOS BIODIGESTORES.....	40

5.7 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DO CAVACO UTILIZADO E DO BIOGÁS GERADO.....	40
5.7.1 <i>PayBack</i> e Valor Presente Líquido (VPL).....	41
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
6.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	42
6.2 PARÂMETROS AVALIADOS PARA ESTUDO DAS AMOSTRAS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	44
6.2.1 pH das amostras coletadas	45
6.2.2 Sólidos Totais das amostras coletadas	46
6.2.3 Sólidos Voláteis das amostras coletadas	47
6.2.4 DQO das amostras coletadas.....	49
6.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS.....	50
6.4 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NOS BIODIGESTORES	52
6.5 PODER CALORÍFICO DO CAVACO UTILIZADO E DO BIOGÁS PRODUZIDO	53
6.6 CONSUMO DE CAVACO E BIOGÁS.....	55
6.7 ENERGIA DERIVADA DA LENHA E DO BIOGÁS.....	55
6.8 ECONOMIA DERIVADA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO.....	56
6.9 PAYBACK E VALOR PRESENTE LIQUIDO	58
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFÊNCIAS.....	63
ANEXOS	69

1 INTRODUÇÃO

O conceito de geração distribuída vem sendo adotado em países de primeiro mundo e traz consigo a abertura do livre mercado de energia elétrica, além do incentivo à indústria pelo planejamento, implantação e gestão de sistemas de geração de energia *in loco*, agregando valor às cadeias produtivas e trazendo consigo diversos outros benefícios.

A produção de biocombustíveis pela utilização de resíduos oriundos do setor agroindustrial vem ganhando um espaço cada vez maior, não somente por serem considerados matérias-primas de baixo custo, mas sobretudo, por mitigarem um impasse ambiental pela possível poluição gerada por esses compostos. Além disso, proporcionam a obtenção de um combustível que não é influenciado pelas flutuações de mercado, como no caso dos combustíveis fósseis.

Por suas características e dimensões continentais, o Brasil se destaca nesse cenário, sendo um dos maiores produtores de biomassa do mundo, seja ela vegetal ou animal. Dentre as culturas utilizadas para produção e processamento citam-se as culturas da soja, milho e a mandioca como as de maior impacto para a balança comercial nacional.

A região sul do país é a que detém boa parte da produção e maior percentagem do processamento da cultura da mandioca. A extração da fécula e processamento das raízes geram grande quantidade de resíduos líquidos com grande potencial poluidor se descartados sem tratamento adequado. Ainda assim, esses resíduos que contém elevada carga orgânica podem se tornar matéria-prima na produção de biogás e na obtenção de um combustível renovável.

Atualmente, no estado do Paraná, muitas fecularias já utilizam a tecnologia de biodigestores para o tratamento da água residuária e produção de biogás. Comumente, o tratamento dos efluentes da indústria é realizado por um conjunto de lagoas e biodigestores, sendo esses efluentes armazenados em reservatórios localizados próximos à indústria, podendo ser reaproveitados ou mesmo posteriormente dispostos em corpos hídricos.

O biogás produzido no tratamento desses resíduos pode ser utilizado diretamente como combustível para as caldeiras que alimentam o processo da própria indústria, reduzindo ou extinguindo o consumo de lenha e cavaco. Além disso, o excedente pode ser utilizado para geração e venda de energia elétrica

através de sistemas moto-geradores, garantindo economia para as empresas, gerando receitas e agregando valor a toda cadeia produtiva da mandioca.

2 JUSTIFICATIVA

Devido ao aumento na demanda energética e a necessidade na redução da dependência dos combustíveis fósseis, pesquisas visando potencializar e otimizar fontes alternativas de energia são desenvolvidas pelas principais nações com a finalidade de garantir uma segurança energética.

O processo de biodigestão anaeróbia, além de tratar diversos resíduos orgânicos, facilitando sua posterior gestão, ainda tem como produto de processo o biogás, combustível passível de utilização em caldeiras, geradores, motores de combustão interna e células a combustível, bem como pode ser utilizado em sistemas de reforma para produção de bio-hidrogênio.

O processo produtivo nas fecularias é gerador de grandes volumes de resíduos com elevada carga orgânica e grande teor de nutrientes, nocivos ao meio ambiente quando despejados em corpo hídrico sem tratamento. Frente a isso, surge o processo de biodigestão anaeróbia no tratamento de efluentes. Tal tecnologia tem a capacidade de reduzir os passivos ambientais, gerando energia alternativa, agregando valor aos produtos e aumentando a competitividade agroindustrial.

Neste sentido, evidencia-se nesta pesquisa questões importantes relacionadas a viabilidade econômica da biodigestão anaeróbia, assim como os benefícios ambientais dos biodigestores em unidades processadoras de mandioca.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Descrever e analisar o desempenho do sistema de tratamento anaeróbio de água residuária, a geração e o aproveitamento energético do biogás em uma indústria processadora de mandioca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a eficiência do sistema de tratamento biológico dos efluentes com lagoas e biodigestores que visam a redução de carga poluidora da água residuária da fecularia;

Realizar um levantamento do potencial de produção de biogás em relação à quantidade de resíduo gerado no processo produtivo na fecularia;

Analisar a geração e o aproveitamento do biogás, identificando os resultados financeiros obtidos com a instalação de biodigestores na Fecularia Horizonte para o ano de base 2018.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 O CENÁRIO DA MANDIOCA NO BRASIL E NO MUNDO

A mandioca é um dos alimentos mais consumidos no mundo, principalmente nas regiões tropicais, onde o cultivo ocorre em maior intensidade. Destaca-se pela sua rusticidade e grande capacidade de adaptação a condições desfavoráveis de clima e solo, além de sua multiplicidade de usos, seja para consumo humano, animal ou industrial (CONAB, 2018).

A cultura é muito apreciada na culinária brasileira, sendo uma importante fonte de nutrientes, adaptando-se em condições climáticas e ambientais por todo o país, tornando-se um dos principais produtos de subsistência no meio rural. Além do consumo *in natura*, sua produção dá início a uma importante cadeia produtiva agroindustrial, produzindo farinha ou fécula de mandioca. Sua origem se deu provavelmente no Brasil, sendo disseminada por outros continentes por portugueses e espanhóis no período colonial. O Brasil liderou a produção da raiz até 1991, quando foi ultrapassado pela Nigéria (CONAB, 2018).

O Brasil se destaca como o quarto maior produtor mundial de mandioca, com um total de 23,24 milhões de toneladas. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018) a produção brasileira de raiz de mandioca no mês de fevereiro de 2018 foi de 20,8 milhões de toneladas, cultivadas numa área de 1,4 milhões de hectares (CONAB, 2017).

A mandioca é cultivada em todos os estados brasileiros, destacando-se os estados do Pará, Paraná, Maranhão, São Paulo e Rio Grande do Sul como os maiores produtores de mandioca em 2017, respectivamente. A cultura é utilizada tanto para o consumo *in natura*, quanto para servir como matéria-prima para a agroindústria na produção de fécula de mandioca, farinha, polvilho, entre outros (EMBRAPA, 2017).

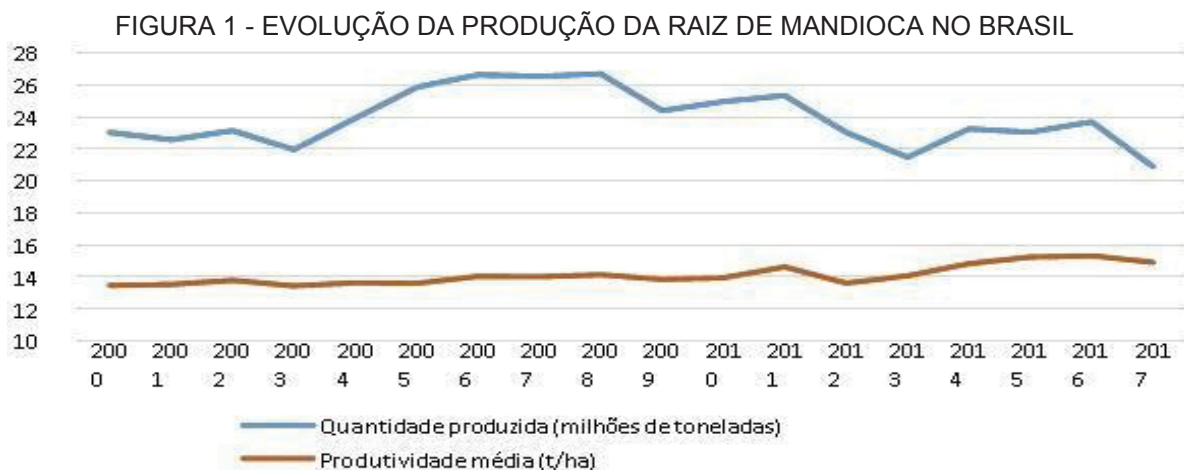
Cultivada principalmente por produtores de pequeno porte, a mandioca possui potencialidades econômicas importantes. De acordo com a Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB, 2015), na safra de 2014/15, o Paraná cultivou cerca de 156 mil hectares e a colheita foi de 4 milhões de toneladas de mandioca em raiz, o que equivale a 17% sobre a produção nacional de 24 milhões de toneladas.

Com exceção de algumas concentrações, o cultivo de mandioca está presente em grande parte dos municípios paranaenses, sendo que existem duas modalidades de exploração: a mandioca industrial com áreas maiores e concentrada nos Núcleos Regionais de Paranaíba, Umuarama, Campo Mourão e Toledo; e a mandioca de mesa ou de consumo animal, cultivada em áreas menores e presente no restante do Estado (SEAB, 2015).

4.2 MERCADO INTERNO DA MANDIOCA

De acordo com o CONAB (2017), em levantamento realizado junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), a produção brasileira de raiz de mandioca atingiu 23,71 milhões de toneladas no ano de 2016, com uma área colhida de 1,55 milhões de hectares. Em 2017, a safra foi 11,8 % inferior, sendo colhidas 20,90 milhões de toneladas devido à redução da área plantada observada na maioria dos estados brasileiros.

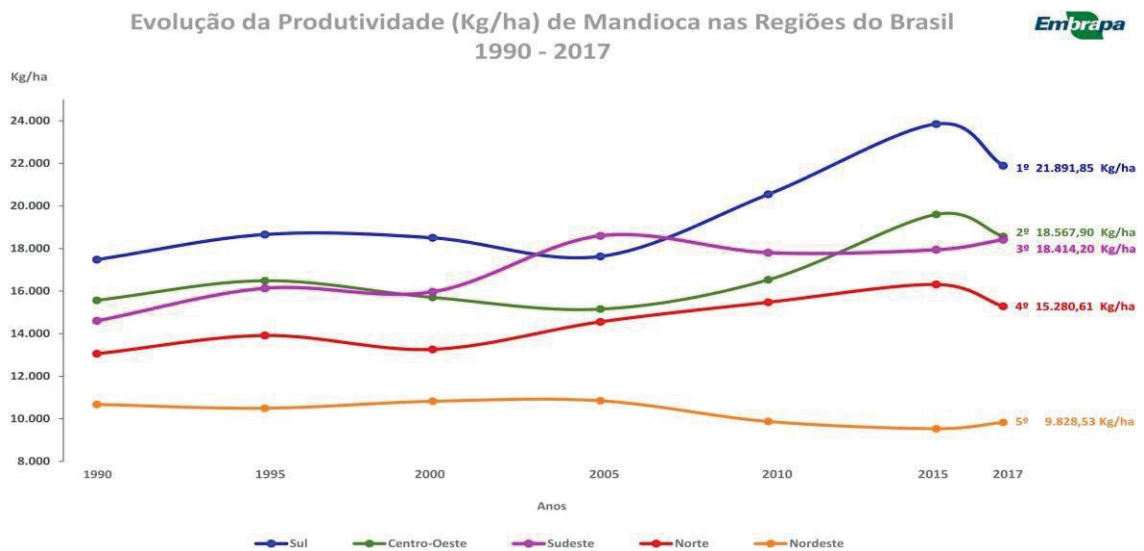
Segundo a EMBRAPA (2017), a região nordeste apresenta o menor rendimento nacional de mandioca produzida por hectare plantado (9.828,53 kg/ha), mesmo sendo detentora da maior parte das áreas plantadas no território brasileiro e com expressivas produções em toneladas de mandioca. A Região Norte, mesmo ocupando grandes áreas plantadas, e tendo atualmente a maior produção de mandioca do país, ocupa apenas a 4ª posição em produtividade, com 15.280,61 kg/ha. A partir da Figura 1, visualiza-se a evolução da produção da mandioca no Brasil nos últimos anos.



FONTE: IBGE, 2017

A partir da Figura 2, observa-se o destaque de crescimento na produtividade para a região Sul com 21.891,85 Kg/ha no ano de 2017, ocupando atualmente a 1ª colocação. A região Centro-Oeste vem na 2ª posição, com 18.567,90 kg/ha (EMBRAPA, 2017).

FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA MANDIOCA POR REGIÃO DO PAÍS



FORNTE: IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

Quanto ao Paraná, a Secretaria de Agricultura e do Abastecimento (Seab/Deral) estima que a área a ser colhida com mandioca totalize 126,9 mil hectares neste ano, recuo de 2 % frente à do ano passado. No entanto, o órgão considera que a produtividade deve aumentar 9 %, chegando a 25,8 toneladas por hectare, o que levaria à produção de 3 milhões de toneladas, 7 % maior que a de 2017 (CEPEA, 2018).

O principal produto obtido da mandioca é o amido que possui várias aplicações e subprodutos, a exemplo da indústria química, alimentícia, metalúrgica, papelaria, têxtil, farmacêutica, plástica, em lamas para perfuração de poços de petróleo, lavanderias, entre outros. O amido pode ainda ser modificado através de processo físico químico e, no estado natural, apresenta certa estabilidade em água fria. A mandioca é cultivada e industrializada em grande escala na produção de diversos derivados amiláceos. Quanto mais clara é a cor, melhor é a qualidade do amido. A cor indica se a mandioca é velha ou não, como também a limpeza com que o amido é processado (ABAM, 2016).

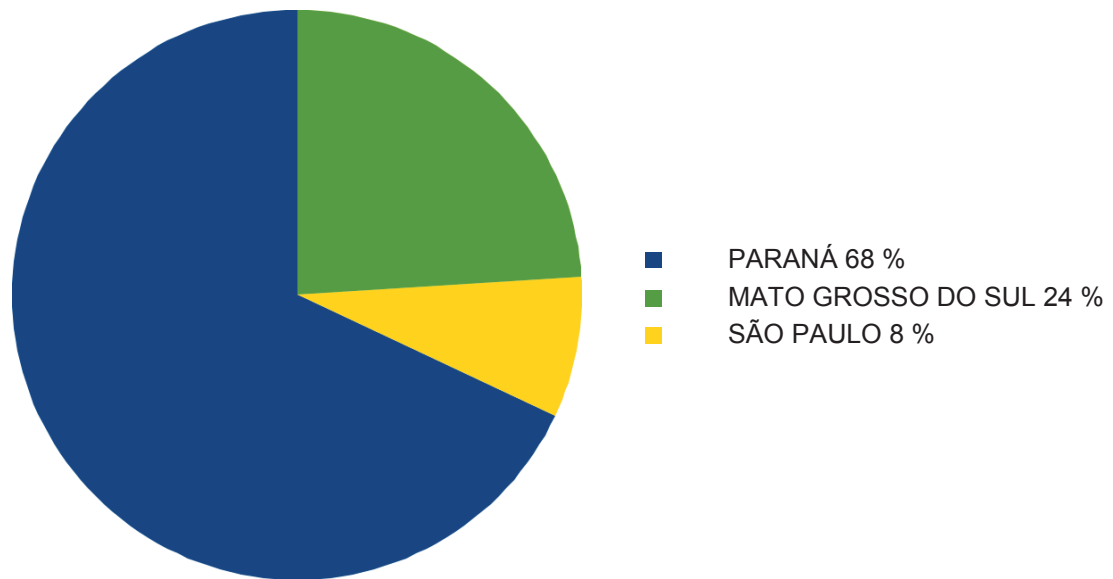
4.3 PRODUÇÃO DE FÉCULA NO BRASIL

Considerada como cultura de subsistência e matéria-prima industrial, a mandioca é cultivada em todas as regiões do Brasil. Mesmo com recentes quedas na produção de raízes, o Brasil ainda se encontra dentre os maiores produtores mundiais, no entanto, a produção de fécula é baixa, principalmente quando se compara com os países asiáticos que figuram entre os maiores exportadores do produto. Enquanto foram produzidas 3,2 milhões de toneladas de fécula de mandioca na Tailândia em 2016, a produção brasileira no mesmo período foi de 616,2 mil toneladas, de acordo com levantamento mais recente do Cepea (CEPEA, 2017).

De acordo com o censo da indústria brasileira de fécula, elaborado pelo Cepea (2018), indica-se que, com a capacidade instalada desta indústria no Brasil seria possível alcançar produção próxima a 1,5 milhões de toneladas, evidenciando que este elo tem forte ociosidade. Isso corrobora a perda de competitividade frente a amidos substitutos, especialmente o de milho que tem sido utilizado nos principais segmentos industriais, como na indústria de papel, química e de amidos modificados.

Como já citado em seções anteriores, o estado do Paraná é um dos principais produtores de fécula do país. Em 2015 existiam 78 fecularias instaladas e 73 em operação no Brasil. Deste total, 42 empresas estão no Paraná (57,5 %), 14 em Mato Grosso do Sul (19,2 %), nove no estado de São Paulo (12,3%), sete em Santa Catarina (9,6 %) e uma na Bahia (1,4 %). Nesse contexto, o Paraná representa mais de 65 % da produção nacional, tendo na sequência o Mato Grosso do Sul, São Paulo e em menor escala o estado de Santa Catarina (Figura 3). Destes, o Mato Grosso do Sul vem apresentando uma significativa evolução e acredita-se que nos próximos anos sua produção continue aumentando (SEAB, 2017).

FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE FÉCULA NOS PRINCIPAIS ESTADOS PRODUTORES DO BRASIL PARA O ANO DE 2015



FONTE: CEPEA (2016)

As exportações do setor também têm apresentado significativo crescimento, sobretudo em função da revolução industrial propiciada pelas diversas modificações químicas do amido de mandioca, as quais geraram variados tipos de amidos modificados de mandioca. O setor atraiu grandes multinacionais para o Brasil que passaram a exportar o amido de mandioca brasileiro para todos os continentes do mundo (ABAM, 2016).

4.4 ÁGUA RESIDUÁRIA DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA

Na fabricação de amido de mandioca há geração de elevado montante de efluente líquido. Este efluente líquido resultante do processamento da mandioca é constituído por: (1) água de lavagem das raízes que é originária dos lavadores/descascadores; (2) manipueira ou água vegetal que corresponde a água de constituição da raiz, extraída durante a prensagem da massa ralada na fabricação da farinha; e (3) água de extração de fécula, que corresponde a água de constituição da raiz, diluída com a água de extração (CEREDA, 2001).

A manipueira, efluente líquido obtido no processo, é altamente prejudicial ao meio ambiente quando depositada sem tratamento em leitos de rios ou lençóis freáticos, causando sérios impactos ambientais. Apresenta elevado potencial em gás

metano, podendo este ser utilizado como recurso energético para as próprias fecularias, reduzindo assim o custo de produção da fécula de mandioca, dado que poderia haver menor utilização de energia elétrica, ou mesmo de lenha para o aquecimento de caldeiras (FELIPE et al. 2009).

Apresenta composição rica em nutrientes, carboidratos e minerais. Além desses compostos, a manipueira apresenta em sua composição glicosídeos cianogênicos, como a linamarina (CASSONI e CEREDA, 2011), um composto tóxico que em contato com o suco gástrico de animais se degrada em cianeto. De acordo com Pawlosky et. al (1991), em fecularias, o volume de água gerado no lavador varia entre 2,5 a 5 m³ por tonelada de mandioca e, dependendo do tipo de equipamento utilizado são gerados mais 2 a 3 m³ de água vegetal por tonelada.

Mesmo diluída na água de extração, a manipueira ainda apresenta elevado teor de matéria orgânica, tornando necessário um tratamento adequado para que possa ser descartada sem causar danos ao meio ambiente. Esse problema se agrava em virtude de a concentração das indústrias localizar-se nas regiões sul do país e Mato Grosso do Sul (LEONEL e CEREDA, 1998).

O tratamento anaeróbio de efluentes provenientes da agroindústria tem aumentado nos últimos tempos por apresentar vantagens significativas comparativamente aos processos mais comumente utilizados de tratamento aeróbio, como a baixa produção de lodo e a redução de custos por não necessitar de aeradores. A produção do biogás gerado no processo pode ser aproveitada de diversas formas na própria atividade (FEIDEN, 2001).

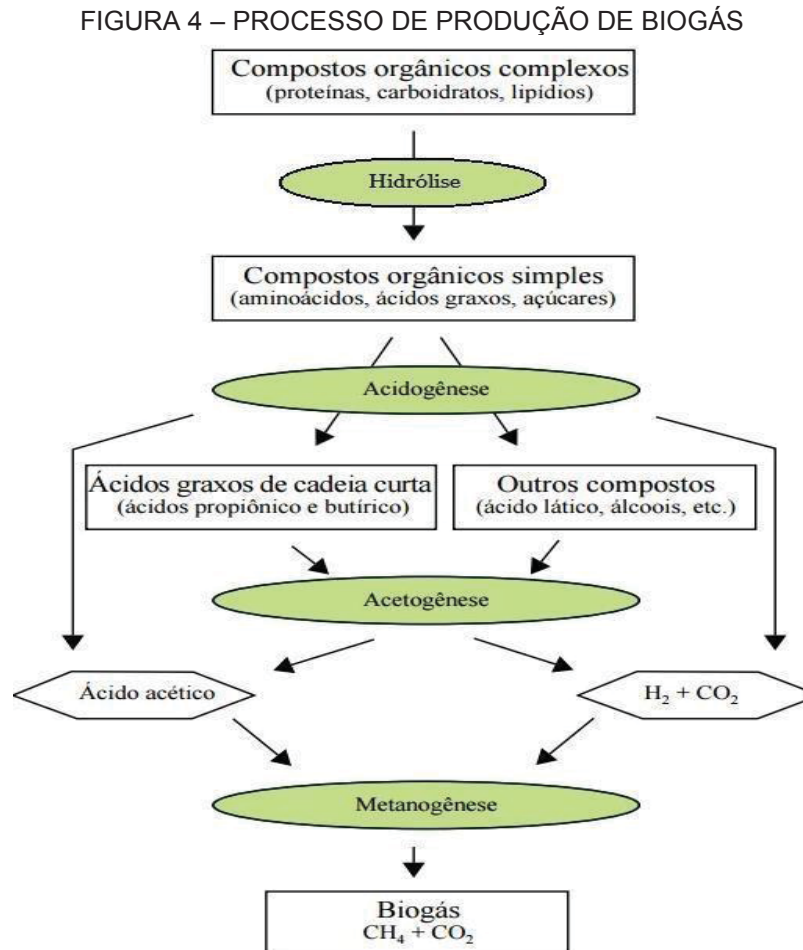
4.5 FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA

Segundo Lora e Venturini (2012), os processos biológicos de tratamento de efluentes possuem principalmente dois objetivos: saneamento ambiental e produção de energia na forma de biogás. A biodigestão anaeróbia é um processo no tratamento de resíduos que, a partir da degradação da matéria orgânica geram como produto gás metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), entre outros gases, além de um efluente líquido e estabilizado que pode ser utilizado como biofertilizante (MEIER, 2016). É um processo natural que ocorre sem a presença de oxigênio molecular, no qual um determinado grupo de microrganismos, como bactérias

acidogênicas e metanogênicas atuam em conjunto para promover uma fermentação autorregulada e estável da matéria orgânica (DEMIRER e CHEN, 2005).

Ainda segundo Lora e Venturini (2012), a digestão anaeróbica pode ser considerada um processo dentro de um ecossistema, onde diversos grupos de microrganismos trabalham conjuntamente na conversão da matéria orgânica em diversos gases, além da síntese de novas células bacterianas.

As principais reações bioquímicas que ocorrem no processo caracterizam os grupos de microrganismos predominantes, podendo ser divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (LORA e VENTURINI, 2012). O esquema das rotas bioquímicas de produção de biogás pode ser visualizado a partir da Figura 4.



FONTE: GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS: GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO, (2010).

A degradação da matéria orgânica inicia-se com a hidrólise do material presente no efluente, gerando como resultado compostos mais simples que agora

podem ser assimilados pelos microrganismos. Normalmente os compostos orgânicos complexos (polímeros orgânicos) são transformados em monômeros, tais como açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, dentre outros. Esta conversão é executada por enzimas extracelulares que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrofílicas. Na degradação de muitos compostos poliméricos há possibilidade da etapa hidrolítica ser mais lenta que as demais etapas, sendo esta a que limita o processo (LORA e VENTURINI, 2012).

Na fase de acidogênese, as moléculas reduzidas pelas enzimas extracelulares podem ser absorvidas por bactérias acidogênicas, e posteriormente excretadas na forma de ácidos orgânicos, como os ácidos acético, propiônico, butírico, fórmico e láctico, além de alguns álcoois, dióxido de carbono e hidrogênio molecular (PATIL et al., 2016).

De todos os compostos produzidos por estes microrganismos, somente o ácido acético e o H_2 podem ser assimilados pelas bactérias metanogênicas (LORA e VENTURINI, 2012). Por isso, é na etapa de acetogênese que esses produtos oriundos da acidogênese formam os substratos para produção do metano, sendo eles o acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (FORESTI et al. 1999). Finalmente ocorre o processo de metanogênese, onde o metano é produzido por bactérias acetotróficas, com a redução do ácido acético, e pelas bactérias hidrogenotróficas com a utilização do CO_2 e H_2 . Nesta etapa, o processo de degradação do substrato, quando ocorrido de forma eficiente, é concluído em CH_4 e CO_2 (ABBASI et al., 2012; LORA e VENTURINI, 2012).

A grande importância dada aos organismos metanogênicos se volta ao fato de serem úteis não apenas por auxiliarem na decomposição de matéria orgânica, mas também por produzirem um gás (CH_4), que pode ser aproveitado como combustível. Na indústria, este é geralmente utilizado para o aquecimento de caldeiras, substituindo a lenha ou cavaco.

4.6 FATORES DETERMINANTES PARA A ATIVIDADE ANAERÓBICA

Segundo Lora e Venturini (2012), diversos fatores podem afetar e influenciar o processo de digestão anaeróbica, reduzindo sua eficiência na remoção de matéria orgânica e até mesmo alterando as proporções de metano no biogás produzido. Nos

itens a seguir serão detalhados alguns dos principais fatores que afetam o processo de digestão anaeróbia.

4.6.1 Temperatura

De acordo com Lora e Venturini (2012) pesquisas têm registrado a aplicação do processo anaeróbico em diferentes faixas de temperatura que podem ser classificadas como: faixa psicrófila (0-20 °C); faixa mesófila (20-45 °C); e faixa termófila (45 °C e acima).

As mais diversas pesquisas realizadas com biodigestores indicam uma relação entre produtividade do processo e a faixa de temperatura de operação. Sabe-se também que sob temperaturas inferiores a 10 °C, ocorre a inibição de boa parte da atividade microbiana, interrompendo o processo. Variações bruscas de temperatura acima de 5 °C em um dia podem interromper a atividade de bactérias e resultar na formação de ácidos voláteis não digeridos. A produção de biogás duplica a cada 10 °C de aumento de temperatura na faixa de 15 °C a 35 °C. Isso ocorre porque temperaturas mais elevadas aceleram a velocidade das reações biológicas, resultando em uma operação mais eficiente e em tempo de retenção menor (CORTEZ et al., 2008).

4.6.2 pH

De acordo com Foresti (1998), o pH ótimo para a biodigestão anaeróbia é de 6,8 a 7,5, no entanto, o processo continua de forma eficiente num limite entre 6 e 8, embora em taxas menos elevadas. Faixa semelhante é relatada por Mao et al. (2015) que afirmam que faixas ótimas de pH se situam entre 6,8-7,4.

Segundo Cortez et al. (2008), num reator anaeróbio, o controle do pH é função da alcalinidade por meio do acúmulo de carbonatos e bicarbonatos, tamponando a fração de CO₂ diluída na fração líquida, os ácidos voláteis ionizados e o nitrogênio sob a forma de amônia.

4.6.3 Composição e Concentração de Resíduos

A concentração de resíduos é fator determinante na escolha do processo de tratamento a ser utilizado. A composição do resíduo a ser tratado também afeta diretamente a produção de biogás, sendo muito importante o conteúdo de sólidos voláteis (SV) e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos. O conteúdo de sólidos não deve ser superior a 9 % em decorrência da dificuldade no transporte do material, entupimentos nos sistemas de alimentação, além de dificultar o acesso dos microrganismos a uma maior área de superfície do composto a ser degradado (CORTEZ et al., 2008).

Com relação a composição dos compostos orgânicos, Lora e Venturini (2012) afirmam que os elementos químicos presentes em maior quantidade na composição dos microrganismos são: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre, compostos necessários e interessantes para a manutenção dos ciclos celulares dos microrganismos.

4.6.4 Tempo de Retenção Hidráulica

De acordo com Lora e Venturini (2012), Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) é o tempo necessário para que a mistura a ser digerida passe pelo biodigestor. O TRH ideal é aquele que proporciona maior remoção de sólidos e maior produção de gás em menor tempo. Seu valor depende do substrato, tipo de digestor, além de outros fatores, e pode variar de 50 dias, em alguns tipos de digestores rurais, a apenas algumas horas em determinados digestores industriais.

4.7 PRODUTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Atualmente, muitos estudos estão sendo realizados para o melhor entendimento e compreensão dos biodigestores, pois este sistema de tratamento de resíduos apresenta-se com elevado potencial no campo da biotecnologia, uma vez que pode promover a degradação de matérias orgânicas geradas em grandes quantidades nas mais diversas atividades, sejam elas industriais ou agroindustriais, fornecendo bioprodutos e contribuindo para a geração de fontes alternativas de

energia. Além disso, apresenta-se como uma ferramenta na gestão de práticas sustentáveis, atendendo as demandas legais para o tratamento de resíduos.

A biodigestão anaeróbia apresenta um componente líquido (efluente) e uma mistura de gases (CH_4 , CO_2 e, em proporções menores H_2S e outros compostos). As aplicações mais conhecidas para o componente líquido são como biofertilizante e, em alguns casos, como ração e inseticida. Como biofertilizante, esse material tem propriedades superiores ao esterco ou ao resíduo que lhe deu origem, isso porque o processo de biodigestão degrada a matéria orgânica em compostos que se apresentam mais disponíveis e com nutrientes parcialmente solubilizados, possibilitando o restabelecimento do húmus do solo. Além disso, o processo de biodigestão também reduz significativamente o potencial poluidor e riscos sanitários dos dejetos (CORTEZ et al., 2008).

Segundo Santos e Siqueira (2012) o biogás tem um conteúdo energético elevado, semelhante ao gás natural, podendo substituí-lo em muitas aplicações. Estas características físico-químicas somadas a outras características do biogás afetam a escolha da tecnologia usada em sua combustão, limpeza e conservação de equipamentos térmicos convencionais para biogás. Os dados da Tabela 1 mostram um comparativo entre o biogás e outros gases.

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS COMPARADO AO DE OUTROS GASES

Combustível	Poder Calorífico (KJ/m³)
Biogás	*22.300
Gás Natural	38.425
Metano	37.015
Propano	92.260

* Valor aproximado, podendo variar de acordo com a composição do biogás. FONTE: Cortez et al. (2008).

A vantagem do biogás em relação ao gás natural é o fato de ser renovável e produzido em locais onde exista disponibilidade de biomassa, como é o caso das feculárias, possibilitando o tratamento adequado dos resíduos agroindustriais e gerando energia térmica que pode ser utilizada substituindo parcialmente o uso de lenha ou cavaco, reduzindo os custos de produção (Santos e Siqueira 2012).

Segundo Cortez et al. (2008), o biogás era simplesmente encarado como um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbica (sem a presença de

oxigênio) de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Quioto, a implementação dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação dos preços dos combustíveis convencionais vêm aumentando as pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas, como o biogás.

A composição do biogás gerado no processo produtivo varia de acordo com as características de cada resíduo. A variabilidade do poder calorífico do biogás se deve pela quantidade de metano existente, e este, em função da sua pureza (TEIXIRA, 1998). O metano, principal componente do biogás possui concentração média de 50 a 65 % no biogás, enquanto o dióxido de carbono apresenta-se nas proporções médias de 25 a 45 %, além de traços de H₂S, N₂, H₂, CO e O₂. Seu poder calorífico é cerca de 5500 Kcal.m⁻³, ao passo em que a proporção em metano é aproximadamente de 60 % (IANNICELLI, 2008). Na Tabela 2 estão descritos os componentes e suas respectivas proporções no biogás, avaliando-se diferentes resíduos.

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS PROVENIENTE DE DIFERENTES RESÍDUOS ORGÂNICOS

Gases	Concentração (%)
Metano (CH ₄)	40 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 40
Nitrogênio molecular (N ₂)	0,5 – 2,5
Oxigênio molecular (O ₂)	0,1 – 1
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH ₃)	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0,0 – 0,1
Hidrogênio molecular (H ₂)	1 – 3

FONTE: Castañon (2002).

Assim sendo, o uso dos reatores para obtenção do biogás pode possibilitar a redução na compra de outros combustíveis, promovendo um incremento substancial as demandas energéticas e reduzindo os custos de produção.

Vale destacar a equivalência obtida do metro cúbico do biogás se comparado a outras fontes de energia, como pode ser verificado na Tabela 3.

Combustível por excelência, o biogás é um produto compatível com os demais combustíveis disponíveis no mercado para a geração de energia, com a

vantagem de agregar a retirada de resíduos poluentes do meio ambiente, fornecendo uma contínua e renovável fonte de energia.

TABELA 3 - EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE BIOGÁS (60% DE METANO) E OUTROS COMBUSTÍVEIS

Combustível	Equivalência de 1m³ de biogás
Gasolina	0,613 litro
Óleo diesel	0,553 litro
Gás de cozinha (GLP)	0,454 litro
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 litro
Eletricidade	1,428 kW

FONTE: Pacheco (2006).

O gás metano, ou biogás, ao contrário do álcool da cana-de-açúcar e de óleos extraídos de outras culturas não compete com a produção de alimentos no que diz respeito ao uso de terras disponíveis, podendo ser inteiramente obtido de resíduos agrícolas, ou mesmo de excrementos de animais e do homem (BARREIRA, 2011).

Segundo Zanette (2010), as aplicações mais comuns para o biogás são o aquecimento e a geração de eletricidade, sendo que dentre as diversas aplicações industriais, este é utilizado para a produção de vapor. A queima do biogás em caldeiras é uma tecnologia bem estabelecida e confiável, existindo poucas restrições em relação à sua qualidade. Diversas tecnologias estão disponíveis, sendo as principais utilizações em geradores com combustão interna e em turbinas a gás (LANTZ, 2006).

Neste contexto, (BARREIRA, 2011) salienta que a energia do biogás surge como uma excelente oportunidade de fonte alternativa de produção de energia descentralizada, não para substituir, mas para ser incorporada às matrizes energéticas convencionais, proporcionando ganhos não somente na produção de energia, como também em importantes benefícios ambientais amplamente conhecidos.

4.8 TRATAMENO DE MANIPUEIRA POR PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

De acordo com a RESOLUÇÃO Nº 70/2009 – CEMA e as alterações da Resolução CEMA 72/2009 que dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelecem-se condições e critérios para Empreendimentos Industriais, determinando que as cargas máximas de DQO em efluentes de lavagem de mandioca podem ser lançados em corpos d'água no Paraná, desde que não sejam superiores a 350 mg/L.

Dentre os sistemas de tratamento que podem ser utilizados no tratamento desses resíduos destaca-se a digestão anaeróbica como uma importante ferramenta na prática de uma gestão sustentável, uma vez que a energia entra sistemicamente na unidade, suprimindo custos operacionais, agregando valor aos produtos e gerenciando corretamente os resíduos gerados no processo produtivo.

Diversos trabalhos científicos relatam a utilização do processo de biodigestão anaeróbica no tratamento de águas residuárias oriundas do processamento da fécula de mandioca. A partir da Tabela 4 pode-se visualizar os resultados de algumas dessas pesquisas.

TABELA 4 – TRABALHOS QUE UTILIZARAM A MANIPUEIRA EM PROCESSOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Trabalho	Condições	Remoção de carga orgânica	Produção de biogás
Barana e Cereda (2000)	Biodigestor bifásico	88,89 % (DQO)	80,9 % (teor de metano); 1,04 L/gDQO dia (volume de metano)
Andrade et al. (2016)	Biodigestor com alimentação semi-contínua; TRH de 30 dias; temperatura de 29 °C; 4% teor de sólidos totais	-	0,843 m³/kg SV adicionados (volume de metano)
Kuczman et al. (2017)	Biodigestor horizontal tubular; TRH de 7 dias; temperatura de 33 °C	88 % (DQO)	53,7 % (teor de metano)
Chavadej et al. (2019)	Biodigestor bifásico; temperatura de 55 °C; taxa de alimentação 10,29 kg/m³dia	41 % e 23 % (DQO no primeiro e segundo reatores, respectivamente)	70,5 % (teor de metano); 259 mL CH ₄ /g DQO removido

Lu et al. (2019)	Biodigestores com alimentação contínua e semi-contínua; TRH de 57,6 horas; 30 °C	23,2 % (DQO solúvel)	468 L/2d (taxa de produção de biogás)
Jiraprasertwong et al. (2019)	Biodigestor trifásico; manta de lodo; fluxo ascendente; temperatura de 37 °C taxa de alimentação 15 kg/m ³ dia de DQO	92,5 % (DQO)	328 mL CH ₄ /g DQO

Fonte: O autor (2018).

Segundo Cremonez et al. (2013), o tratamento de resíduos líquidos de fecularias, como a manipueira por processos de digestão anaeróbia ainda necessita de adaptações e otimização de parâmetros dos processos. No entanto, revisão de literatura apresentada pelos autores demonstram resultados positivos e encorajadores com relação a produção de biogás e utilização deste como combustível nas próprias linhas de produção das amidonarias e fecularias.

4.9 CONSUMO DE LENHA/CAVACO NO PROCESSO PRODUTIVO DAS FECULARIAS

O processo produtivo nas fecularias é gerador de resíduos com alta carga orgânica e toxicidade. Entretanto, o tratamento destes resíduos em reatores anaeróbios, visando degradar a matéria orgânica, além de gerar biogás, pode ser uma interessante opção para redução de impactos ambientais. O biogás gerado nos biodigestores pode ser aproveitado para alimentar as caldeiras, reduzindo os custos com a compra de lenha/cavaco, afetando conseqüentemente os custos de produção e tornando os produtos mais competitivos.

A produção de biogás nas fecularias vem ganhando espaço cada vez maior, impulsionada pelos crescentes investimentos no setor que estimulam pesquisadores a descreverem novos processos e novas tecnologias na busca por modelos agroindustriais sustentáveis capazes de alcançar benefícios ambientais e melhorias na qualidade e na competitividade.

Dessa forma, observam-se dois potenciais benefícios: o econômico, devido ao aproveitamento energético, gerando economia na compra de lenha; e o

ambiental, uma vez que ao se queimar o CH₄ mitigam-se os impactos em relação às emissões de CO₂ equivalente, devido ao fato do CH₄ ser 21 vezes mais poluente que o CO₂ para efeitos de aquecimento global (IPCC, 2007). A economia de consumo de lenha também pode trazer outros benefícios ambientais, como o de conservação de recursos e menores emissões atmosféricas, principalmente em relação ao material particulado.

4.9.1 A utilização do biogás (estudo de múltiplos casos)

A característica mais desejada de um combustível consiste em seu alto poder calorífico. De acordo com Friedl et al. (2005), o poder calorífico é o principal parâmetro utilizado para avaliar o potencial energético da biomassa e é definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível. Segundo Andrade et al. (2013), o valor médio do poder calorífico de cavaco com casca está entre 4579,25 Kcal/Kg, inferior ao do biogás que é de cerca de 5500 Kcal/m³, tendo-se a proporção em metano em aproximadamente 60 % (IANNICELLI, 2008).

Diversos estudos são realizados no sentido de buscar parâmetros que considerem os benefícios e as potencialidades a partir da instalação de biodigestores nas indústrias de processamento de mandioca. Neste sentido, os estudos de casos realizados em empresas que fazem uso de biodigestores podem ser utilizados como laboratório para o monitoramento dos processos, bem como possibilitar o desenvolvimento de novas estratégias para medir e relatar impactos e desempenhos relacionados a sustentabilidade.

Assim sendo, Guimarães et al. (2017) utilizaram-se do método qualitativo, por meio de estudo de casos múltiplos em três empresas processadoras de mandioca: duas feculárias e uma farinheira da região oeste do Paraná. O trabalho desta pesquisa foi restrito ao desenvolvimento e instalação do sistema de biodigestor que aproveita o biogás produzido em lagoas de estabilização para tratamento de efluentes das indústrias, utilizando-o nas próprias caldeiras das empresas processadoras de mandioca. A seleção das empresas pesquisadas considerou a importância de se avaliar a tecnologia em mais de uma organização para fins de comparação em escalas de processamento, tecnologia e estruturas organizacionais diferentes.

Assim como a Fecularia Horizonte, foco da atual pesquisa, as três empresas pesquisadas por Guimarães et al. (2017) localizam-se nas regiões Oeste e Noroeste do Estado do Paraná: Amidonaria C. Vale (Unidade Assis Chateaubriand); Amidos Pasquini (Cianorte) e Alimentos do Zé (Nova Esperança).

De acordo com o trabalho dos respectivos autores, a partir da Tabela 5 é possível observar os valores antes e após a instalação dos equipamentos de aproveitamento de biogás para cada uma das empresas estudadas. Na tabela, verifica-se que a Amidos Pasquini teve a maior economia de combustível lenha com o aproveitamento do biogás nas caldeiras, com uma redução de 95 % no consumo.

Ainda sobre os resultados da referente pesquisa, observa-se que a Alimentos do Zé apresentou a menor taxa de economia (50 %), provavelmente porque, entre outros fatores, a lagoa havia sido reformada poucos meses antes da pesquisa, havendo necessidade de maior tempo para que o processo de biodigestão se estabilize.

TABELA 5 – CONSUMO DE LENHA (MATERIAIS USADOS POR MASSA E VOLUME)

Caso de estudo	Amidonaria C. Vale	Amidos Pasquini	Alimentos do Zé
Consumo médio diário de lenha antes do aproveitamento do biogás	32 toneladas	18 toneladas	9 toneladas
Consumo médio diário de lenha após aproveitamento do biogás	9,6 toneladas	0,9 toneladas	4,5 toneladas
Percentual de economia do combustível lenha com o aproveitamento do biogás	70 %	95 %	50 %
Quantidade média de mandioca moída diariamente	400 toneladas	200 toneladas	200 toneladas
Consumo médio diário de lenha antes do aproveitamento do biogás por tonelada de mandioca moída	80 kg	90 kg	45 kg

FONTE: Guimarães et al. (2017).

Na Tabela 6 verificam-se os volumes médios de lenha consumidos por empresa, assim como o valor numérico em quilocalorias dessa lenha. Com as quantidades de mandioca processadas por dia, calculou-se o consumo médio

energético, em quilocalorias para moagem de um quilo de mandioca, antes e após o aproveitamento do biogás nos biodigestores.

TABELA 6 – ENERGIA DERIVADA DE LENHA CONSUMIDA POR EMPRESA POR UNIDADE DE PRODUÇÃO

Empresa	Lenha consumida diariamente média (kg)		Poder calorífico consumido diariamente em lenha (kcal)		Mandioca moída por dia (kg)	Poder calorífico consumido por quilo de mandioca moída (kcal)	
	Antes do biogás	Após biogás	Antes do biogás	Após biogás		Antes do biogás	Após biogás
	C. Vale	32.000	9.600	83.200.000		24.960.000	400.000
Amidos Pasquini	18.000	900	43.200.000	2.160.000	200.000	216	10,8
Alimentos do Zé	9.000	4.500	22.500.000	11.250.000	200.000	112	56

FONTE: Guimarães et al. (2017).

4.9.2 Relação do consumo energético entre a lenha e biogás

Na Tabela 7 visualiza-se a energia derivada de lenha economizada por empresa, por unidade de produção com a recuperação e utilização do biogás produzido nas lagoas de estabilização.

TABELA 7 – ENERGIA DERIVADA DE LENHA ECONOMIZADA POR EMPRESA

Empresa	Combustível	Poder calorífico consumido por quilo de mandioca moída		Economia em kcal por tonelada de mandioca processada	Economia (%)
		Antes do biogás	Após o uso do biogás		
C. Vale	Lenha	208 kcal	62,4 kcal	145,6	70 %
Amidos Pasquini	Lenha	216 kcal	10,8 kcal	205,2	95 %
Alimentos do Zé	Lenha	112 kcal	56 kcal	56	50 %

FONTE: Guimarães et al. (2017).

Na presente pesquisa apresentou-se o poder calorífico consumido de lenha, antes e depois do aproveitamento do biogás por quantidade de mandioca processada. Utilizando-se essas unidades de medida foi possível comparar as empresas dentro dos mesmos valores relativos por quilo de mandioca processada.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 ESTUDO DE CASO

Uma pesquisa científica deve definir seu objeto de estudo e, a partir daí, construir um processo de investigação, delimitando o universo que será estudado (VENTURA, 2007). Dentro desse contexto, o estudo de caso tem por característica uma análise detalhada, de modo a explicar a dinâmica dos procedimentos estudados para uma unidade individual, e a partir dela inferir tendências que possam ser aplicadas em grande escala.

De acordo com Ventura (2007), como qualquer pesquisa, o estudo de caso é geralmente organizado em torno de um pequeno número de questões que se referem a como e ao porquê da investigação. É provável que questões como essas estimulem também o uso de experimentos e pesquisas históricas.

Através desta metodologia foi possível realizar um monitoramento do sistema de tratamento dos resíduos gerados no processo produtivo de uma agroindústria, alvo da pesquisa, durante o período de janeiro a dezembro de 2018, por meio de pesquisa *in loco*. Coletaram-se amostras semanais de resíduos em diversos pontos do sistema de tratamento, coletas de gás em períodos alternados e relatórios de produção e consumo, bem como dados financeiros relacionados ao biogás utilizado nas caldeiras.

Todos os dados deste estudo foram fornecidos por técnicos responsáveis da indústria, sendo que a análise e discussão destes foi realizada através de embasamento em revisão literária sobre o tema.

5.2 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida na Fecularia Horizonte, localizada na PR 491, a 10 quilômetros de Marechal Cândido Rondon, Distrito de Novo Três Passos, na região Oeste do estado do Paraná (Figura 5). O foco principal do trabalho foi avaliar a eficiência do sistema de tratamento de resíduos para remoção de matéria orgânica, bem como os benefícios referentes ao fornecimento de energia térmica a partir do biogás produzido pelos biodigestores. A indústria possui uma capacidade produtiva de 300 toneladas/dia, gerando amidos *in natura* e modificados

para abastecimento do mercado interno e externo, exportando para diversos países da América do Sul. Esta produção consome em média 1500 m³ de água por dia, sendo que 70 % deste consumo é captado de poço artesiano localizado na própria indústria, e o restante fornecido pelo sistema de abastecimento de águas municipal. A empresa também adquire comercialmente lenha e cavaco para o aquecimento das caldeiras.

FIGURA 5 – VISÃO AÉREA DA INDUSTRIA ONDE A PESQUISA FOI DESENVOLVIDA



FONTE: Imagem da internet (2019).

5.3 COLETA DE DADOS PARA O DELINEAMENTO DA PESQUISA

As informações para o desenvolvimento da pesquisa foram coletadas por meio de três procedimentos:

1. Visita e análise *in loco* com suporte dos responsáveis de coletas, registro das informações e observações durante o período de junho à dezembro de 2018;
2. Coletas de amostras de resíduos e posterior análise no laboratório da Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina para determinação de ST, SV e DQO. Tais análises permitem obter a eficiência na remoção da carga orgânica e aferir o valor de pH dos efluentes, a fim de verificar se houve acidificação dos reatores.

3. Coleta de amostras *in loco* da composição físico-química do biogás realizada por cromatografia gasosa para determinação da composição dos gases do biogás.

5.4 COLETA DAS AMOSTRAS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

As amostras de efluentes foram coletadas semanalmente, no período de junho à dezembro de 2018. Essas amostras foram coletadas em frascos de 200 mL, lacráveis, em dias e horários alternados, buscando-se maior amplitude na caracterização dos efluentes. Em seguida, as mesmas foram refrigeradas segundo a NBR 9898 (ABNT, 1987) e conduzidas ao Laboratório de Produção de Biocombustíveis da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Setor Palotina para sua caracterização.

Os efluentes foram coletados em três pontos do Sistema de Tratamento de Resíduos (STR) e estão assim descritos: Amostra – (A1) entrada do efluente no biodigestor; Amostra - (A2) saída do efluente do biodigestor; Amostra – (A3) última lagoa, última etapa do processo.

5.5 PARÂMETROS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A determinação das concentrações de Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e pH foram realizadas em cada amostra coletada para verificar a eficiência da remoção de matéria orgânica sob condições distintas como: sazonalidade produtiva, tempo de retenção hidráulica (TRH) e temperatura, uma vez que na região sul do país, nos períodos de inverno, essa última é mais extrema e afeta a atividade microbiana. Os parâmetros físico-químicos analisados e as metodologias utilizadas estão descritos na Tabela 8, ressaltando-se que todas as análises foram realizadas em duplicata.

TABELA 8. ANÁLISES E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS UTILIZADOS NA PRESENTE PESQUISA

Análise	Método
pH	Potenciométrico (4500-H* / APHA, 1995)
DQO	Colorimétrico (5220-D / APHA, 1995)
ST	Gravimétrico (2540-B / APHA, 1995)
SV	Gravimétrico (2540-E / APHA, 1995)

FONTE: O autor (2018)

5.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NOS BIODIGESTORES

Foram coletadas amostras de biogás a cada 2 meses durante o período estudado, obtendo-se um total de quatro amostras. A determinação de composição dos principais componentes (hidrogênio, dióxido de carbono e metano) foi realizada por cromatografia gasosa em sistema Shimadzu® 2010, equipado com coluna capilar Carboxen® 1010 plot (30 m x 0,53 mm x 0,30 µm). O argônio com vazão de ar de make-up de 8 mL/min foi utilizado como gás de arraste. Foram injetados 500 µL de amostra e a temperatura do injetor foi ajustada para 200 °C. A detecção foi realizada em detector de condutividade térmica (TCD) à temperatura de 230 °C. O forno foi programado para operar à temperatura inicial de 130 °C e aquecido a 135 °C a uma taxa de 46 °C/min durante 6 minutos (PENTEADO et al., 2013).

5.7 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DO CAVACO UTILIZADO E DO BIOGÁS GERADO

Para o desenvolvimento da avaliação financeira, a empresa forneceu dados e informações referentes à quantidade de cavaco comprado, bem como o valor gasto durante o período. Foram disponibilizadas ainda informações referentes ao volume de biogás utilizado nas caldeiras e a quantidade de amido produzido.

A coleta destes dados considerou a importância de avaliar os benefícios financeiros obtidos com a utilização do biogás como fonte de energia térmica nas caldeiras da fecularia, sobretudo a redução no consumo de cavaco. Neste sentido, através dos dados fornecidos realizou-se uma projeção estimada de consumo de cavaco com e sem o incremento de biogás, o que possibilitou estimar o valor médio gasto de cavaco por tonelada de amido produzido e a economia gerada.

5.7.1 *PayBack* e Valor Presente Líquido (VPL)

A análise da viabilidade financeira foi realizada segundo os parâmetros de *Payback* e (VPL) Valor Presente Líquido. Para calcular a viabilidade financeira foi realizado orçamento para a instalação de dois biodigestores e seis lagoas, realizado por empresa da região de Marechal Cândido Rondon - PR em 2019, juntamente com o conjunto de dados fornecidos pela empresa alvo da pesquisa, possibilitando estabelecer um cálculo de retorno do investimento.

Para calcular o juro do mercado foi utilizada a Taxa de Selic que segundo (SILVA et al., 2016) representa o desconto que esse dinheiro teria em fontes seguras, que de acordo com o Banco Central (2019) está em 6%, é a taxa básica de juros da economia. É o principal instrumento de política monetária utilizado pelo Banco Central (BC) para controlar a inflação. Ela influencia todas as taxas de juros do país, como as taxas de juros dos empréstimos, dos financiamentos e das aplicações financeiras.

O *Payback* ou (período de recuperação de capital), conforme Nogueira (2007), consiste em determinar o número de períodos necessários para recuperar o capital investido. O mesmo avalia a atratividade de um investimento, todavia não serve para seleção entre possibilidades de investimento. Conforme Marquezan e Brondani (2006), a fórmula para cálculo do *Payback* é dada pelo valor do retorno por período dividido pelo valor do investimento.

O valor presente líquido (VPL) tem como finalidade calcular, em termos de valor presente, o impacto dos eventos futuros associados a uma alternativa de investimento (SAMANEZ, 2009). Desta forma, esta ferramenta possibilita quantificar os fluxos de caixa obtidos com o projeto ao longo da sua vida útil. Samanez (2009), destaca que a decisão de realizar ou não o investimento resume-se simplificada da seguinte forma: $VPL > 0$, o projeto é aceito; $VPL = 0$, é indiferente aceitar ou não; $VPL < 0$, o projeto é rejeitado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Segundo dados fornecidos pelos gestores da Amidonaria Amidos Horizonte (Figura 6), a indústria possui uma capacidade produtiva de 300 ton/dia, produzindo amidos *in natura* e modificados para abastecimento do mercado interno e externo, exportando para diversos países da América do Sul. Esta produção consome em média 1500 m³ de água por dia, a qual, 70 % é captada de poço artesiano localizado na própria indústria e o restante é fornecida pelo sistema de abastecimento de águas municipal. A empresa também compra lenha/cavaco para o aquecimento das caldeiras.

FIGURA 6 – AMIDONARIA AMIDOS HORIZONTE - LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA



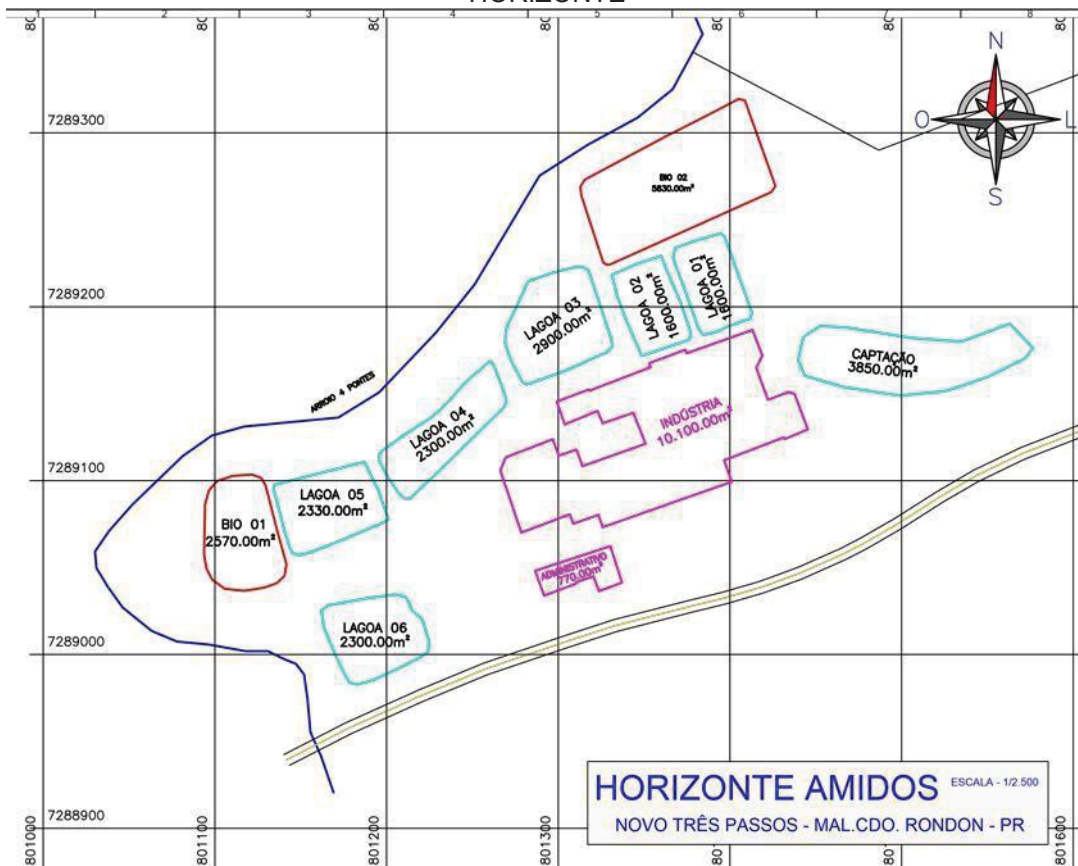
FONTE: o autor (2018).

O tratamento dos efluentes da indústria é realizado por dois biodigestores e seis lagoas aeradas, de estabilização e facultativas, conforme descrito na Figura 7.

Os efluentes provenientes do processo produtivo da fecularia escoam por gravidade para os biodigestores. O primeiro biodigestor (BIO 1) que recebe o resíduo apresenta área de 2.570 m² e profundidade de 3 m. O segundo biodigestor (BIO 2) possui uma área de 5.870 m², sendo que, por localizar-se na parte mais alta do terreno recebe os efluentes por bombeamento.

Após ser tratado nos biodigestores, o efluente escoa por gravidade para duas lagoas, (LAGOAS 1 e 2), ambas com 16.000 m² e 4 metros de profundidade. Em seguida, o efluente passa para outra lagoa aerada (LAGOA 03), cuja área é de 2.900 m² e 5 m de profundidade, da qual escoa por gravidade para uma quarta lagoa (LAGOA 4) de área 2.300 m² e 5 m de profundidade. Encontram-se ainda dispostas duas lagoas facultativas (LAGOAS 5 e 6) com área de 2.330 m², podendo o efluente, após o processo de tratamento, ser despejado em corpo hídrico localizado nas proximidades da indústria. Tal processo está descrito na Figura 7.

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FECULARIA HORIZONTE



FONTE: O autor (2018).

Na Figura 8 pode-se observar o sistema de tratamento de resíduos integrado à unidade industrial, cuja localização permite o tratamento dos resíduos na proporção em que os mesmos são gerados no processo produtivo, bem como a produção de biogás que é utilizado diretamente nas caldeiras e substitui parcialmente a lenha e cavaco.

FIGURA 8 – IMAGEM DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA FECULARIA HORIZONTE



FONTE: Adaptado a Imagem da internet (2019)

6.2 PARÂMETROS AVALIADOS PARA ESTUDO DAS AMOSTRAS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Na Figura 8 pode-se observar os biodigestores, destacados em vermelho (BIO 1 e BIO 2). As amostras A1 e A2 foram coletadas na entrada e saída do biodigestor dois (BIO 2), localizado na parte superior do terreno, tendo em vista que este recebe efluentes diretamente da unidade industrial. Por gravidade este efluente passa por um conjunto de seis lagoas, mostradas na figura em cor verde, sendo a lagoa três aerada. A amostra A3 foi coletada na lagoa seis, localizada na parte mais baixa do terreno, última lagoa do sistema de tratamento de resíduos da indústria.

Ainda na Figura 8 é possível observar um conjunto de lagoas adicionais que não estão enumeradas ou destacadas. As análises realizadas lagoa seis permitirão determinar a necessidade ou não de utilização destas lagoas adicionais, pois dependem das características do efluente encontrarem-se aceitáveis para o descarte. Em caso de necessidade, o efluente é bombeado por dutos que passam por baixo da rodovia PR 491 e são lançados nestas.

6.2.1 pH das amostras coletadas

Os valores de pH nas amostras A1, A2 e A3 mantiveram-se entre 5,39 e 8,22. Como é possível observar na Tabela 9, os valores obtidos na A3 ficaram entre 7,39 e 8,22, com média anual de 7,77. Tais valores se encontram dentro do padrão estabelecido pela Resolução CONAMA 430 e SEMA 024 (2008), as quais determinam que o pH deve se apresentar na faixa entre 5 a 9.

TABELA 9 – DESCRIÇÃO DOS DADOS DE PH PARA AMOSTRAS MENSAIS COLETADAS

	A1	A2	A3
JUN	6,22	6,49	7,64
JUL	5,72	6,38	7,6
AGO	5,39	6,55	7,39
SET	6,04	6,51	7,72
OUT	5,96	6,61	7,8
NOV	5,94	6,96	8,22
DEZ	5,59	6,74	8,05
MÉDIA	5,83	6,60	7,77

FONTE: O autor (2019).

A variação de pH de entrada das amostras (A1) e saída do biodigestor, amostras (A2) com resultados próximos a neutralidade na saída indicam boa condução do processo de biodigestão. O pH ácido da entrada é caracterizado por parcela de ácidos orgânicos presentes no efluente e sua saída com pH próximo a neutralidade indica consumo desses compostos pelas *archeas* metanogênicas. O bom desempenho dos microrganismos consumidores de metano auxilia na caracterização de um processo eficiente pelo fato desses organismos apresentarem alta sensibilidade a pequenas variações das condições operacionais.

Além da conformidade com as resoluções acima mencionadas, os dados obtidos nas amostras estão dentro do valor ideal para o desenvolvimento de microrganismos metanogênicos. O controle do pH é importante e limitante no crescimento microbiano, e para evitar complicações no processo, seu valor deve estar entre 6,0 e 8,0, sendo a faixa ótima de operação de 6,70 a 7,40 para digestão anaeróbia (RIZZONI et al., 2012).

6.2.2 Sólidos Totais das amostras coletadas

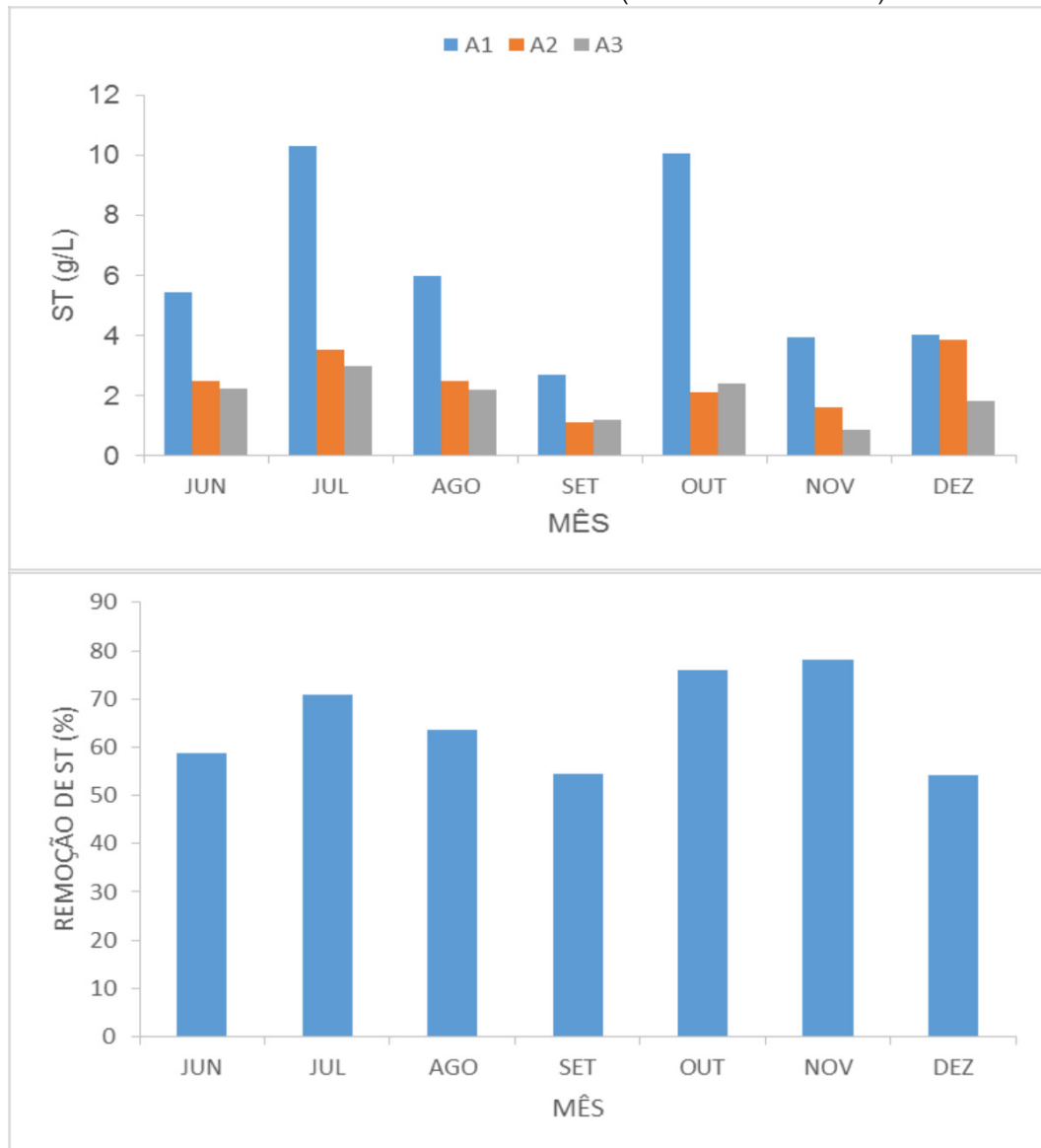
As concentrações de sólidos no sistema de tratamento podem ser visualizadas a partir das Figuras 9 (A e B) e 10 (A e B). Estas concentrações apresentaram variações significativas ao longo do período estudado, em decorrência da sazonalidade de recebimento de mandioca na indústria, predominantemente no segundo semestre. A Resolução Conama nº 357/05 não estipula um valor limite para sólidos totais no despejo de efluentes industriais, não sendo possível analisar e comparar os dados obtidos com a legislação vigente.

Kunzler et al. (2013) estudaram o processo de biodigestão em dois reatores anaeróbios com volumes de 6 e 6,8 L no tratamento de efluente de fecularia, variando as cargas orgânicas volumétricas (4,34, 4,70 e 5,60 g/L). Os resultados obtidos por esses autores são compatíveis com os da presente pesquisa, embora seja possível observar pontos *outliers*.

Conforme verifica-se na Figura 9 A, os valores dos volumes de Sólidos Totais variaram entre 2,69 g/L e 10,31 g/L, enquanto que a remoção variou de 45,79-78, 22 %. Os valores obtidos se adequam a faixa estipulada para o processo de biodigestão anaeróbia e se aproximam dos encontrados por Torres (2009) que obteve valores de remoção de ST de 79,12 %, ao aplicar carga de 3,05 g/L. Do mesmo modo, Araújo (2015) cita uma comparação das médias dos tratamentos de sólidos totais e de sólidos voláteis, variando entre 2,5 e 10,0 g/L, e obtendo eficiência média entre 66,21 e 78,33 % de remoção de ST.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se observar a eficiência no tratamento dos resíduos em cada etapa do processo. Na amostra A1 os efluentes apresentaram média de Sólidos Totais de 6,07 g/L mês, reduzindo para média mensal de 2,45 g/L na amostra A2 e finalizando o tratamento na amostra A3 com valor médio mensal de 1,97 g/L. Estes resultados indicaram remoção média anual de 68,39 % para Sólidos Totais no balanço geral.

FIGURA 9 – (A) SÓLIDOS TOTAIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAS); (B) SÓLIDOS TOTAIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAS)



FONTE: O autor (2019).

6.2.3 Sólidos Voláteis das amostras coletadas

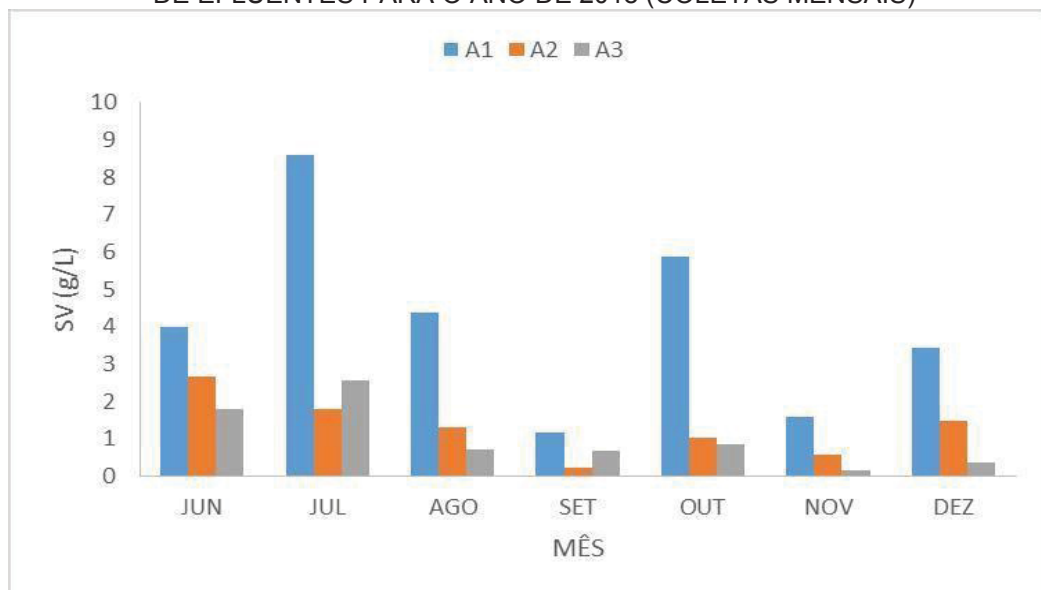
A análise de Sólidos Voláteis é realizada para determinar a quantidade de matéria orgânica que pode ser degradada. Quanto maior a quantidade de matéria orgânica, maior também será o potencial de produção de biogás. Comparando os valores de sólidos e suas frações nos tratamentos A1, A2 e A3, observou-se que estes apresentaram variações expressivas nos resultados durante os meses de junho a dezembro de 2018. Os valores ficaram entre 55,13 % e 89,30 %, contudo,

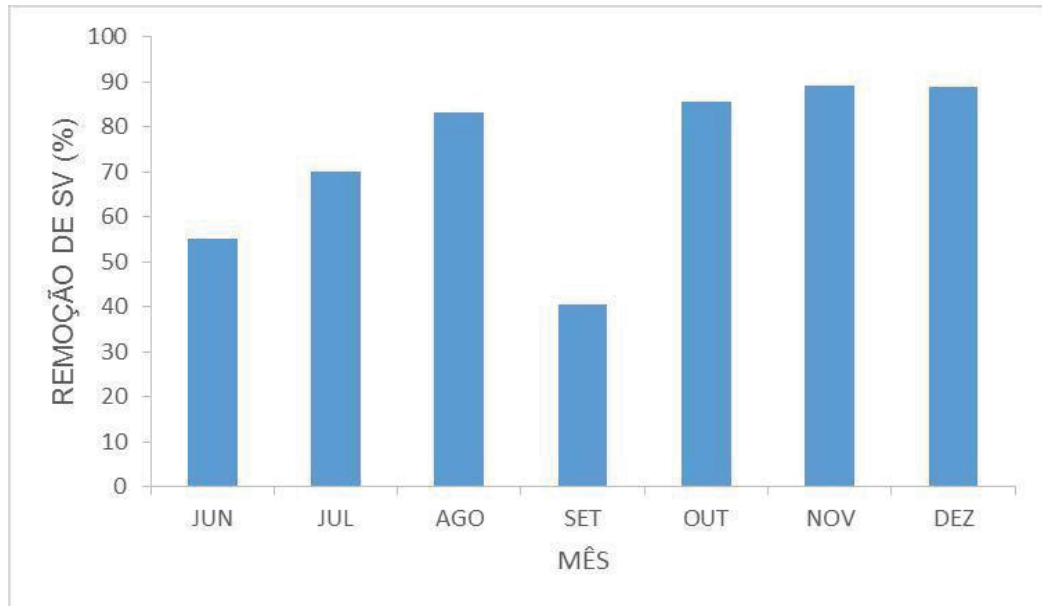
apesar da amplitude de variação, notou-se que houve remoção em todas as variáveis ao longo do processo.

A fração dos SV presente no efluente da amostra A1 é expressiva se comparada ao teor de ST. Isso significa que em média 73,26 % (3,11 g/L) dos ST (4,13 g/L) são compostos orgânicos. São estes compostos os responsáveis diretos pela produção de biogás, e por isso que quanto maior a concentração de SV, maior será a capacidade de produção de biogás.

Na Figura 10 A verifica-se que as maiores remoções de sólidos voláteis, em média ocorreram no segundo semestre. A Figura 10 B indica uma variação na remoção de Sólidos Voláteis de 40,51% à 89,18% com média no período esquisado de 78,91 %. Esses valores demonstram a eficiência do biodigestor, indicando boa capacidade de degradação de matéria orgânica, sendo estes valores próximos aos descritos por Ribas e Barana (2003) com 76,10 % de SV.

FIGURA 10 – (A) SÓLIDOS VOLÁTEIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAS); (B) SÓLIDOS VOLÁTEIS DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAS)





FONTE: O autor (2019).

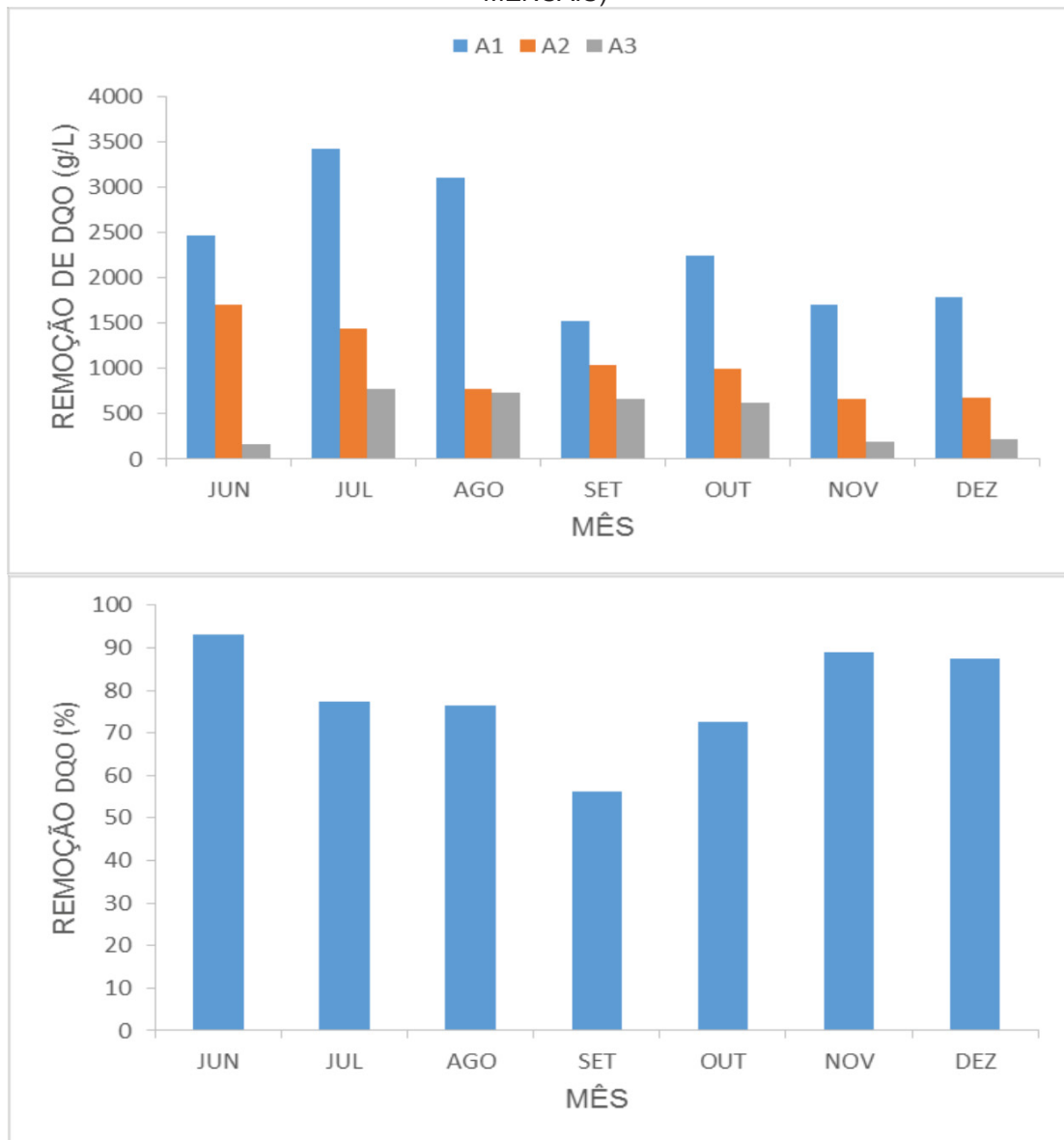
6.2.4 DQO das amostras coletadas

Como já citado na seção de revisão de literatura, de acordo com a Resolução CEMA 070/09, os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente nos corpos de água desde que obedeçam às condições e padrões estabelecidos nesta resolução. Para atendimento dos parâmetros aplicados ao beneficiamento de mandioca, a DQO do efluente não deve ser superior aos 350 mg/L.

Comparando-se os resultados obtidos de DQO no tratamento 3 com o recomendado pela resolução acima mencionada, os valores médios analisados foram de 324,57 mg/L, sendo adequados para lançamento em corpos hídricos e inferiores ao limite estabelecido.

Na Figura 11 A e 11 B estão apresentados os valores referentes a DQO na entrada e na saída do biodigestor, bem como na última lagoa, representados pelas amostras A1, A2, e A3, respectivamente. Nota-se na Tabela 18 (Anexo 4) que a remoção da DQO ficou em média 85,89 %, valores próximos aos descritos por Colin et al. (2007), que, analisando o efluente de uma indústria de fécula de mandioca obtiveram remoção de DQO total de 87 %.

FIGURA 11 – (A) DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAIS); (B) DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES PARA O ANO DE 2018 (COLETAS MENSAIS)

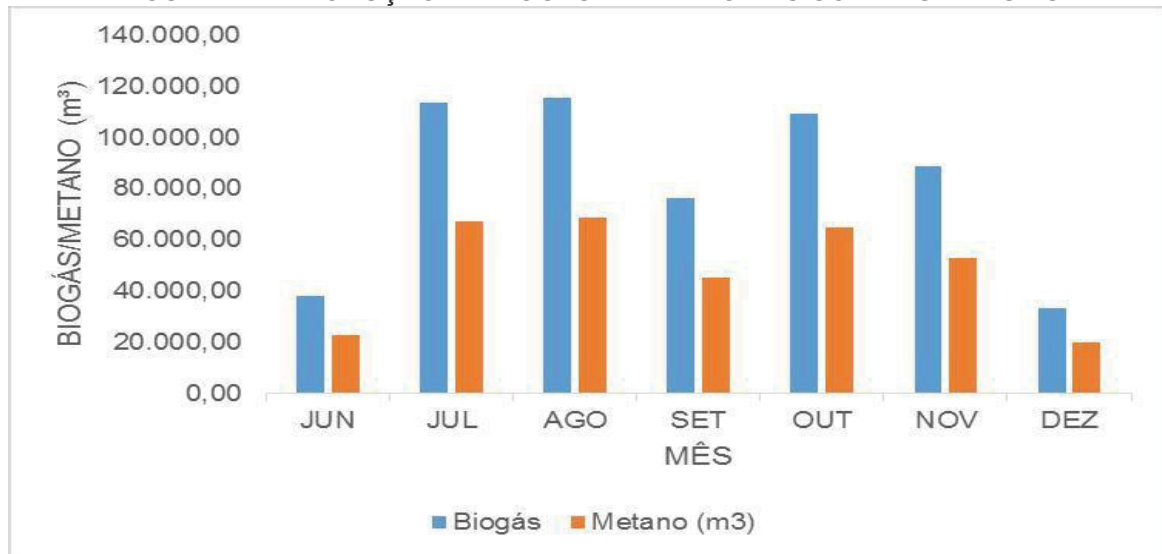


FONTE: O autor (2019).

6.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS

Como já mencionado, os efluentes de fecularia apresentam características bastante favoráveis para a produção de biogás, devido a considerável demanda de matéria orgânica presente em seus compostos. Na Figura 12 é possível analisar a produção de biogás e metano (CH₄) ao longo dos meses coletados.

FIGURA 12 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO NAS COLETAS MENSAIS



FONTE: O autor (2019)

Notou-se que a produção de biogás e metano apresentaram variações significativas durante o período em decorrência da sazonalidade da produção da fecularia. É possível observar que, a partir do segundo semestre, período em que a empresa recebeu maior volume de mandioca, houve um aumento na produção de biogás e, conseqüentemente, um aumento na produção de metano (CH₄).

O produto de maior interesse no biogás é justamente o metano (CH₄) e, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 10, a produção deste composto apresentou variações durante o período, com média de 48.852,98 m³/mês.

Em relação a DQO, ficam evidentes as variações nos resultados das amostras A1, A2 e A3 no período analisado, conforme pode ser visualizado na Figura 11. Os valores encontrados na A1 variaram de 1.524 g/L a 3.424 g/L, com média igual a 2.323,42 g/Lmês. A produção de metano atingiu um pico de 65.120 m³ no mês de outubro, com média de 48.852,98 m³/mês.

De acordo com os resultados, a empresa apresentou uma remoção média de DQO de 87,85 %, produzindo no período de estudo 341.970,91 m³ de metano. A partir desses dados foi possível estimar a produção de metano em relação a quantidade de DQO removida. Analisando-se os dados apresentados na Tabela 10, observou-se que para cada grama de DQO removida foram produzidos em média 2,37 L de biogás, dos quais 1,41L são referentes a quantidade de metano produzida. Cabe ressaltar que a produção apresentou variação, conforme mencionado, de acordo com a sazonalidade produtiva da empresa.

TABELA 10 – PRODUÇÃO DE METANO NO PRESENTE ESTUDO

MÊS	Tonelada Mandioca	Volume de Efluente (m ³)	DQO (g/L)	Metano (m ³)	Eficiência MI (LCH ₄ /gDQO rem.)
JUN	2600,43	13002,15	2469	22621,9	0,76
JUL	2748,64	13743,2	3424	67510,49	1,74
AGO	2752,34	13761,7	3110	68671,33	1,91
SET	2243,91	11219,55	1524	45358,04	3,97
OUT	2551,73	12758,65	2251	65120,97	3,11
NOV	1888,48	9442,4	1702	52824,7	3,69
DEZ	1784,07	8920,35	1784	19863,48	1,43
MÉDIA	2367,08	11835,4	2323	48852,98	2,37

FONTE: O autor (2019).

Nos estudos com separação de fases, Barana e Cereda (2000), operando a fase metanogênica de um biodigestor de fluxo ascendente e leito fixo com TRH de três dias, obtiveram uma produção de biogás de 1,84 L/gDQO.

Os resultados referentes a remoção de DQO são utilizados como parâmetro de estabilização da matéria orgânica. Quanto maior sua eficiência de remoção, maior será a degradação do resíduo e, além disso, permite quantificar a produção de metano e, conseqüentemente estimar a redução do uso do cavaco, fornecendo instrumentos de controle financeiro.

6.4 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO NOS BIODIGESTORES

A composição do biogás depende das características do substrato utilizado no processo de biodigestão (MAFACIOLLI, 2012). Na Tabela 11 encontram-se os resultados das análises de biogás, que por sua vez apresentou teor médio de metano igual a 59,5 %.

Segundo Souza et al. (2007), a composição do biogás varia de acordo com o material que lhe deu origem, contudo sua composição básica é de 40 a 70 % de metano (CH₄), 30 a 40 % de dióxido de carbono (CO₂), traços de nitrogênio, hidrogênio e gás sulfídrico.

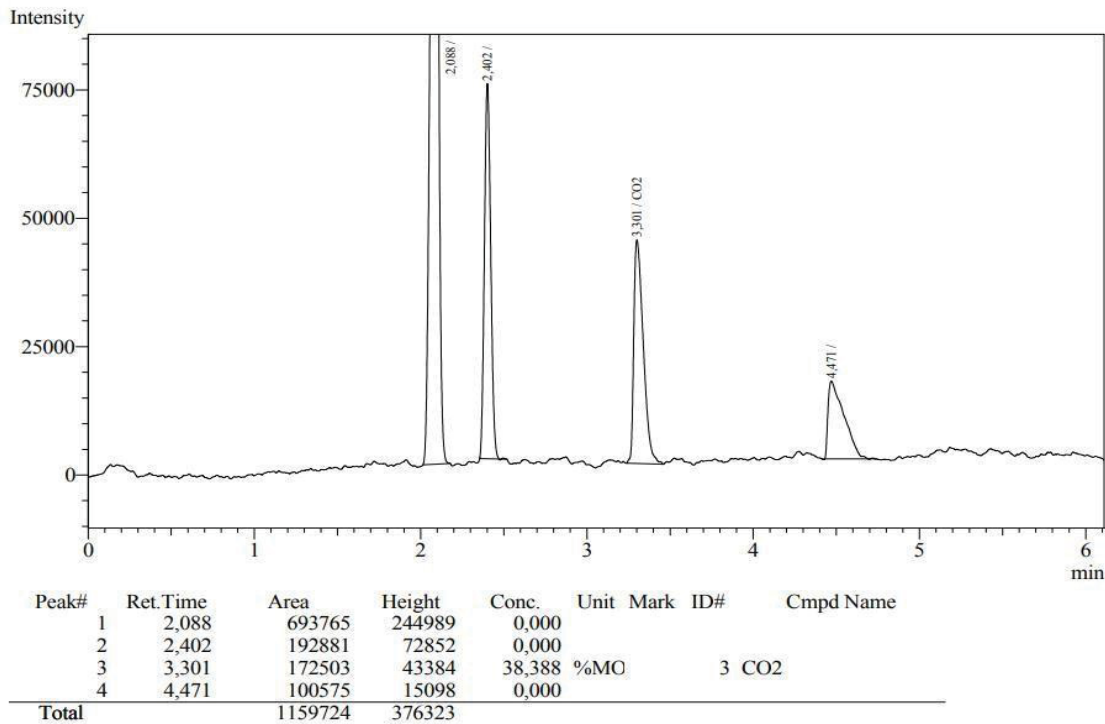
TABELA 11 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO

Metano	Dióxido de Carbono	Hidrogênio
59,5 ± 3,1	40,2 ± 2,5	0,2 ± 0,5

Os valores são as médias seguidas de seus respectivos desvios padrão. FONTE: O autor (2018).

Na Figura 13 pode-se observar os resultados da cromatografia realizada no biogás, visando determinar as concentrações dos principais gases. No cromatograma, os picos 2,0; 2,4; 3,3 e 4,4 correspondem ao gás hidrogênio, nitrogênio, metano e dióxido de carbono, respectivamente.

FIGURA 13 – CROMATOGRRAFIA GASOSA DA AMOSTRA DE BIOGÁS ANALISADA



FONTE: O autor (2019).

6.5 PODER CALORÍFICO DO CAVACO UTILIZADO E DO BIOGÁS PRODUZIDO

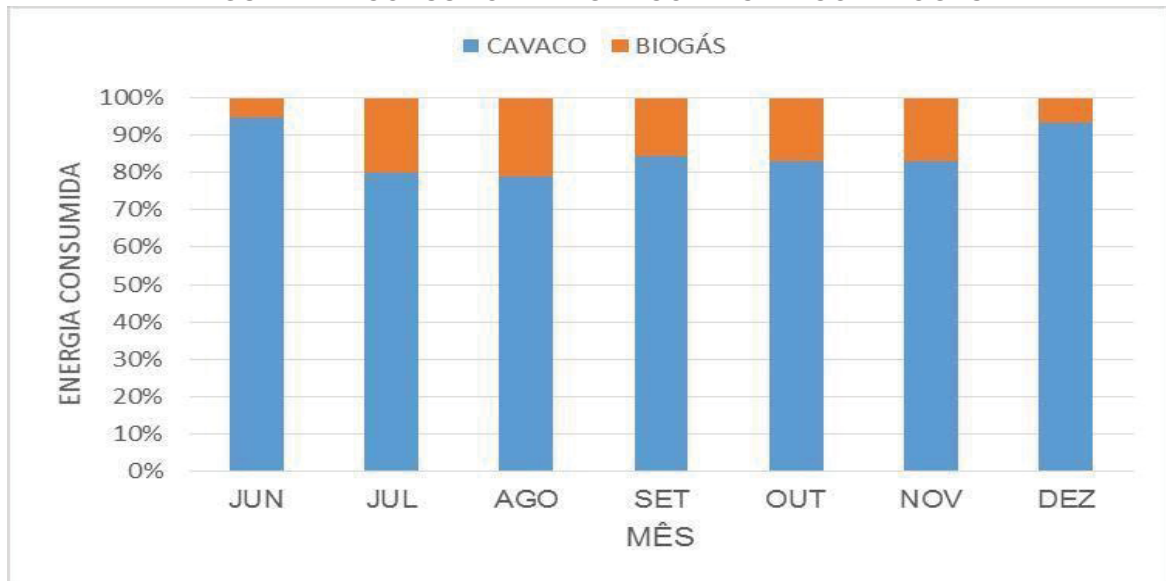
Para a geração de vapor nas caldeiras, a empresa utiliza cavaco de eucalipto com casca adquirido de empresas da região e o biogás proveniente dos biodigestores. A partir da Figura 14 é possível analisar o consumo energético e a parcela de utilização ao longo do período avaliado.

Devido a sazonalidade da cadeia produtiva da mandioca, a empresa recebeu e processou volume maior de mandioca no segundo semestre, conforme

apresentado anteriormente. Desse modo, manteve uma média na produção de amido de 2.253 toneladas mês, gerando um volume médio aproximado de 5 m³ por tonelada de mandioca, ou seja, 10.000.000 m³ de resíduos líquidos mês que correspondem a aproximadamente 50.710 m³ de biogás. De acordo com Pawlosky et al. (1991), em fecularias o volume de água gerado no lavador varia entre 2,5 a 5 m³ por tonelada de mandioca e, dependendo do tipo de equipamento utilizado são gerados mais 2 a 3 m³ de água vegetal por tonelada.

Para calcular o consumo energético foram utilizados dados fornecidos pela empresa, referentes ao consumo de cavaco e o volume de biogás produzido durante o período de 2018. Assim, foi considerado o valor médio do poder calorífico de cavaco com casca, que de acordo com Andrade et al. (2013) é de 4579,25 Kcal/Kg. Já em relação ao biogás, o poder calorífico utilizado foi de 5500 Kcal/m³, valor citado por Lannicelli (2008) para biogás com 60 % de metano em sua composição.

FIGURA 14 – CONSUMO ENERGÉTICO DE CAVACO E BIOGÁS



FONTE: O autor (2018).

Verificou-se desse modo um aumento significativo na utilização do biogás como fonte energética a partir do período em que a empresa passou a receber maior volume de mandioca, gerando conseqüentemente maior volume de resíduos e maior produção deste biocombustível, reduzindo proporcionalmente o consumo de cavaco.

6.6 CONSUMO DE CAVACO E BIOGÁS

Os dados da Tabela 12 demonstram os resultados referentes aos volumes médios de cavaco e biogás consumidos pela empresa entre os meses de junho a dezembro de 2018, sendo que a partir desses dados foi possível calcular o consumo médio de cavaco por tonelada de amido. Durante este período foram consumidos aproximadamente 4.144.960 Kg de cavaco e gastos com a compra de cavaco R\$ 549.301,78. A empresa pagou R\$ 0,13 por quilo deste combustível.

TABELA 12 - DESCRIÇÃO DE CONSUMO CAVACO E BIOGÁS - 2018

PERÍODO	CAVACO (KG)	TOTAL CAVACO (R\$)	BIOGÁS (m ³)	CONSUMO	PRODUÇÃO/
				DE CAVACO *(KG P/T)	AMIDO **(T/MÊS)
JUN	844.100	110.303,78	38020	324,6	2600,43
JUL	546.980	72.019,00	113463	199,2	2748,64
AGO	522.670	67.997,00	115414	189,9	2752,34
SET	488.950	63.171,00	76232	217,9	2243,91
OUT	648.140	86.285,00	109447	254,2	2551,73
NOV	525.000	71.060,00	88781	278,2	1888,48
DEZ	569.120	78.466,00	33384	319,2	1784,07
TOTAL	4.144.960	549.301,78	574.741,00		16569,6

* QUILOGRAMA DE CAVACO POR TONELADA DE AMIDO PROCESSADO; ** TONELADA POR MÊS; FONTE: AGÍCOLA HORIZONTE (2019).

Neste período, a empresa também utilizou como fonte de energia térmica 574.741 m³ de biogás produzidos nos biodigestores que fazem parte do sistema de tratamento de resíduos da unidade industrial, volume este que foi diretamente queimado, juntamente com o cavaco nas caldeiras da indústria.

6.7 ENERGIA DERIVADA DA LENHA E DO BIOGÁS

A partir dos dados fornecidos pela empresa foi possível calcular também a economia gerada a partir da utilização do biogás. A variação para base de cálculo da economia por tonelada de amido considerou apenas a energia derivada de cavaco que segundo dados da indústria, consome em média 394 kg/ton de amido produzido. No ano de 2018 foram processadas 27.036,55 toneladas de amido. Na Tabela 13 estão descritos os resultados da estimativa do custo médio de cavaco por tonelada, considerando um consumo médio de 394 quilos por tonelada de amido ao custo de R\$ 0,13 por quilo.

TABELA 13 – ESTIMATIVA DE CUSTO MÉDIO DE CAVACO POR TONELADA DE AMIDO

MÊS	PRODUÇÃO DE MANDIOCA (T/M)	CONSUMO DE CAVACO (Kg)	GASTO MENSAL EM CAVACO (R\$)	CUSTO ENERGÉTICO POR TONELADA DE MANDIOCA (R\$/ton)
JUN	2.600,43	1.024.569,42	133.194,02	51,22
JUL	2.748,64	1.082.964,16	140.785,34	51,22
AGO	2.752,34	1.084.421,96	140.974,85	51,22
SET	2.243,91	884.100,54	114.933,07	51,22
OUT	2.551,73	1.005.381,62	130.699,61	51,22
NOV	1.888,48	744.061,12	96.727,94	51,22
DEZ	1.784,07	702.923,58	91.380,06	51,22
TOTAL	16.569,60	6.528.422,40	848.694,89	

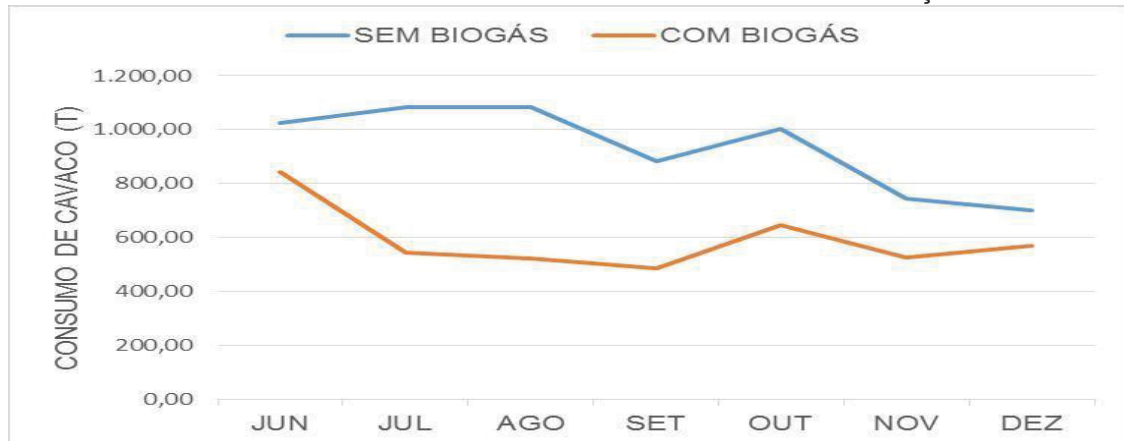
FONTE: O autor (2019).

Assim sendo, através de uma projeção, estimou-se que a empresa consumiria aproximadamente 6.528.422,40 quilos de cavaco durante este período, ao custo de R\$ 848.694,89. Isso representou um custo médio de R\$ 51,22 por tonelada de amido produzido, sem o incremento do biogás.

6.8 ECONOMIA DERIVADA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO

A partir da Figura 15 visualiza-se a projeção do consumo de cavaco, com e sem a utilização do biogás como fonte complementar de energia nas caldeiras. Nota-se que ocorrem variações na produção de biogás e com maior volume de biogás reduz-se significativamente o consumo de cavaco, havendo expressiva redução nos custos de produção.

FIGURA 15 – ECONOMIA DO CAVACO AVALIADA COM E SEM A UTILIZAÇÃO DE BIOGÁS



FONTE: O autor (2019)

A partir da Tabela 14 observa-se a economia gerada com o complemento do biogás no sistema. De acordo com estes resultados, a empresa apresentou economia estimada de aproximadamente 23,71 % sobre os custos na compra de cavaco.

Estimou-se no período estudado um custo de R\$ 848.694,89 na compra de cavaco, sem o complemento do biogás. Ao subtrair a economia gerada na compra de cavaco com o complemento do biogás (R\$ 299.194,07), tem-se um valor de R\$ 549.500,82, valor próximo aos descrito na Tabela 12, que segundo a empresa, representa o valor destinado para a compra de cavaco. Estes dados revelam que a estimativa realizada através do poder calorífico do cavaco e biogás apresentam coerência com o balanço financeiro fornecido pela empresa e indicam uma economia de R\$ 299.194,07 nos custos com energia térmica.

A instalação de biodigestores na unidade industrial teve como objetivos principais o tratamento da água residuária, assim como a busca de economia de energia (cavaco) pela geração e utilização de um combustível produzido no próprio processo de tratamento (biogás). Observou-se que a implantação dos biodigestores na fecularia necessitou de poucas adaptações para aproveitamento do biogás nas caldeiras.

TABELA 14 – ECONOMIA GERADA A PARTIR DA COMPLEMENTAÇÃO COM BIOGÁS PRODUZIDO

MÊS	PRODUÇÃO DE AMIDO (T/MÊS)	ESTIMATIVA DO GASTO ENERGÉTICO (R\$/T)	*GATO ENERGÉTICO COM COMPLEMENTO DO BIOGÁS (R\$/T)	ECONOMIA GERADA POR TNELADA DE AMIDO	ECONOMIA GERADA DE CAVACO (R\$/T/MÊS)
JUN	2600,43	51,22	42,42	8,8	22.888,89
JUL	2748,64	51,22	26,23	24,99	68.693,79
AGO	2752,34	51,22	24,71	26,51	72.974,37
SET	2243,91	51,22	28,15	23,07	51.758,89
OUT	2551,73	51,22	33,84	17,38	44.352,45
NOV	1888,48	51,22	37,65	13,57	25.618,02
DEZ	1784,07	51,22	44,01	7,21	12.862,66
					299.149,07

* Informações fornecidas pela empresa. FONTE: O autor (2019)

6.9 PAYBACK E VALOR PRESENTE LIQUIDO

O orçamento para instalação do sistema de tratamento de biodigestores apresenta investimento inicial de R\$ 796.810,00, proporcionando uma vida útil de 10 a 15 anos. Na Tabela 15, é detalhada toda a composição do orçamento necessário para a implantação do sistema de tratamento da feccularia pesquisada, atualizado para o ano de 2019.

TABELA 15 - ORÇAMENTO DO SISTEMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO

BIODIGESTOR 2					
DESCRIÇÃO	QTDE		VALOR UNITÁRIO		VALOR TOTAL
GEOMEMBRANA 1,00MM	5.400	R\$	22,50	R\$	121.500,00
GEOMEMBRANA 1,25MM	5.300	R\$	33,00	R\$	174.900,00
ACOMPANHAMENTO TÉCNICO	1	R\$	46.000,00	R\$	46.000,00
				R\$	342.400,00
BIODIGESTOR 1					
DESCRIÇÃO	QTDE		VALOR UNITÁRIO		VALOR TOTAL
GEOMEMBRANA 1,00MM	5.400	R\$	22,50	R\$	56.250,00

GEOMEMBRANA 1,25MM	5.300	R\$	33,00	R\$	79.200,00
ACOMPANHAMENTO TÉCNICO	1	R\$	50.000,00	R\$	50.000,00
				R\$	185.450,00

LAGOAS AERADAS E DE ESTABILIZAÇÃO					
DESCRIÇÃO	QTDE		VALOR UNITÁRIO		VALOR TOTAL
LAGOA 1 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	1600	R\$	16,00	R\$	25.600,00
LAGOA 2 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	1600	R\$	16,00	R\$	25.600,00
LAGOA 3 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	2900	R\$	16,00	R\$	46.400,00
LAGOA 4 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	2300	R\$	16,00	R\$	36.800,00
LAGOA 5 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	2330	R\$	16,00	R\$	37.280,00
LAGOA 6 GEOMEMBRANA PEAD 0,8MM	2330	R\$	16,00	R\$	37.280,00
				R\$	208.960,00
HORA MÁQUINA/OUTROS	150	R\$	400,00	R\$	60.000,00
TOTAL				R\$	796.810,00

FONTE: Biokohler (2019)

De acordo com a Tabela 14, a redução no consumo de cavaco, gerada pelo uso do biogás, representa economia de aproximadamente R\$ 299.149,07 durante os meses de junho a dezembro, média mensal de R\$ 42.735,58, revelando uma capacidade de economia na ordem de R\$ 512.826,97 anuais. Em concordância, a Tabela 16 traz o período necessário para que o investimento seja quitado. De acordo com o resultado do *Payback*, do investimento realizado seriam necessários aproximadamente 1 ano e 6 meses aproximadamente para que toda a montante (R\$ 796.810,00) seja paga. Após este período, a empresa passará a lucrar com os biodigestores até o fim de sua vida útil.

TABELA 16 – SALDO POR ANO		
ANO	-R\$	796.810,00
1	-R\$	283.984,00
2	R\$	228.842,00

FONTE: O autor (2019)

O valor presente Líquido (VPL) da análise financeira do sistema de tratamento de resíduos da fecularia pesquisada é descrito na Tabela 17. Destaca-se neste indicador de análise financeira, a Taxa Selic, que conforme o Banco Central é de 6%.

TABELA 17 – VALOR PRESENTE LÍQUIDO

ANO	TAXA DE 6%	FLUXO DE CAIXA
0	R\$ 796.810,00	R\$ 796.810,00
1	R\$ 512.826,97	R\$ 512.826,97
2	R\$ 482.056,44	R\$ 512.826,97
VPL > 0	R\$ 198.073,42	

FONTE: O autor (2019)

De acordo com a Tabela 17, o resultado do (VPL) encontrou-se sendo superior a zero (VPL > 0), VPL positivo de R\$ 198.073,42 indicando que o investimento é considerado economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa neste período é maior que o valor presente das saídas de caixa. O resultado indica que o VPL se torna positivo com um tempo aproximado de 1 ano e 11 meses.

Silva et al. (2016) apresenta indicadores de viabilidade financeira de quatro empresas processadoras de mandioca do Paraná, representadas por empresa A, B, C e D. Na Tabela 18 estão descritos os parâmetros de viabilidade financeira de cada uma das empresas:

TABELA 18 - INDICADORES DE RETORNO DAS EMPRESAS A, B, C e D

Empresa A	VPL	\$502.504
	TIR	123,20%
	<i>Payback</i>	10 meses
Empresa B	VPL	\$182.889
	TIR	24,00%
	<i>Payback</i>	18 meses
Empresa C	VPL	\$1.175.669
	TIR	249,50%
	<i>Payback</i>	7 meses
Empresa D	VPL	\$1.258.557
	TIR	262,00%
	<i>Payback</i>	7 meses

FONTE: Silva et al. (2016).

De acordo com os parâmetros financeiros (*Payback* e VPL) aplicados a este estudo de caso, é possível constatar que o uso do biogás como fonte de energia térmica é financeiramente viável nesta indústria processadora de mandioca. Em estudo de viabilidade técnica e financeira, ESPERANCINI et al. (2007) analisaram a viabilidade de implantação de dois biodigestores em assentamentos rurais com uso de dejetos animais, um para o fornecimento de energia para os domicílios, e outro para as atividades produtivas. O período de recuperação do investimento foi de 2,5 anos e 11 meses, para a utilização de biogás nos domicílios e nas atividades de produção, respectivamente. Os autores também indicaram que esses estudos podem servir como base para o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas ao aproveitamento de biomassa para a produção de energia a baixos custos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os objetivos propostos neste trabalho, constatou-se resultados positivos obtidos com a implementação dos biodigestores na empresa analisada, contribuindo para a construção de dados qualitativos e quantitativos no âmbito dos sistemas de tratamento de resíduos agroindustriais. Dentre os principais benefícios observados ao longo do período pesquisado, observou-se a redução da matéria orgânica presente no efluente da fecularia, com alto potencial poluidor, permitindo atingir os valores estabelecidos em legislação.

Constatou-se que o biogás é um biocombustível que agrega receita para a empresa e produz um saldo financeiro extremamente positivo, reduzindo os custos do processo produtivo com a compra de cavaco. Além disso, traz benefícios ambientais, uma vez que sua queima em caldeiras reduz as emissões de metano.

Com base neste estudo de caso pode-se inferir que a tecnologia dos biodigestores nas indústrias processadoras de mandioca é financeiramente viável, utilizando-se o biogás como fonte de energia térmica. Apesar disso, sugere-se a ampliação de novos estudos, principalmente ao que diz respeito a eficiência dos biodigestores na busca por soluções energéticas financeiramente viáveis e ambientalmente corretas.

REFÊNCIAS

- ABAM - Associação Brasileira dos Produtores de Amido de Mandioca. **Produção brasileira de fécula de mandioca**. 2016. Disponível em: <<http://www.abam.com.br/>>. Acesso em: 24 jun. 2019.
- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. A brief history of anaerobic digestion and “biogas”. In: **Biogas energy**. Springer, New York, NY, 2012. p.11-23.
- APHA. 1995. **Standard methods**. 19th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.
- ANDRADE, T. C. G. R.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E.; AZEVEDO, M. I. R. Biomass yield and calorific value of six clonal stands of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake cultivated in Northeastern Brazil. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 467-472, 2013.
- ANDRADE, W. R.; XAVIER, C. A. N.; COCA, F. O. C. G.; ARRUDA, L. D. O.; SANTOS, T. M. B. Biogas production from ruminant and monogastric animal manure co-digested with manipueira. **Archivos de Zootecnia**, v. 65, n. 251, p. 375-380, 2016.
- ARAÚJO I. R. C. **TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE FECULARIA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR ANAERÓBIO DE LEITO FIXO E FLUXO CONTÍNUO**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em 29 jul. 2019.
- BARANA, A.C.; CEREDA, M.P. Cassava wastewater manipueira treatment using a two-phase anaerobic biodigester. **Food Science and Technology**, v. 20, n. 2, p. 183-186, 2000.
- BARREIRA, Paulo. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para zona rural**. São Paulo: Ícone, 2011.
- CASSONI, V.; CEREDA, M. P. Avaliação do Processo de Fermentação Acética da Manipueira. **Revista Energia na Agricultura**, v. 26, n. 4, p. 101-113, 2011.
- CASTANÓN, N.J.B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. Material do Curso: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, Universidade de São Paulo, São Paulo (2002)
- CEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos industriais**. Disponível em: <www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=abrirAnexo...37606>. Acesso em: 30 mai. 2019.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **MANDIOCA/CEPEA: Produção de fécula ultrapassa 750 mil t em 2015.** Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/pdf/Producao_mandioca_2015_2016.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2019.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Mandioca perspectivas 2018: Desafios de atrair produtores continua; oferta deve seguir restrita.** Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/mandioca-perspec-2018-desafio-de-atrair-produtores-continua-oferta-deve-seguir-restrita.aspx>. Acesso em: 25 set. 2018.

CEREDA, M. P. (Coord.) **Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca.** São Paulo: Fundação Cargill, 2001. v. 4, cap. 13, p. 186-201.

CHAVADEJ, S.; WANGMOR, T.; MAITRIWONG, K.; CHAICHIRAWIWAT, P.; RANGSUNVIGIT, P.; INTANOO, P. Separate production of hydrogen and methane from cassava wastewater with added cassava residue under a thermophilic temperature in relation to digestibility. **Journal of Biotechnology**, v. 291, p. 61-71, 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Mandioca: raiz, farinha e fécula.** Disponível em: <www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_02_16_17_38_32_17.pdf>. Acesso: 07 de outubro/2018.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Mandioca – Análise mensal: fevereiro 2018. Disponível em: file:///C:/Users/Cliente/Desktop/Mandioca_-_Analise_Mensal_-_fevereiro-2018_.pdf

CORTEZ, L. A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (Org). **Biomassa para energia.** Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

COLIN, X.; FARINET, J. L.; ROJAS, O.; ALAZARD, D. Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support. **Bioresource technology**, v. 98, p. 1602-1607, 2006.

CREMONEZ, P.A.; FEIDEN, A.; SANTOS, R.F.; ROSSI, E.; NADALETI, W.C.; ANTONELLI, J. Biodigestão anaeróbia no tratamento de águas residuárias de feculárias. **Acta Iguazu**, v. 2, n. 2, p. 89-99, 2013.

DEMIRER, G.N.; CHEN, S. Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 4, p. 3542-3549, 2005.

DOMINGOS, B. S.; MOREIRA, C. R.; RESENDE, E. W.; RODRIGUES, D. M. S.; DORNELAS, J. O. **estudo de payback simples para a substituição do gás liquefeito de petróleo pelo biogás em uma unidade hospitalar em minas gerais.** Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção. Sergipe (2017).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mandioca em números**. Disponível em: <www.embrapa.br/congresso-de-mandioca-2018/mandioca-em-numeros>. Acesso em: 15 set. 2017.

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

FEIDEN, A. Avaliação da eficiência de lagoas de tratamento de resíduos líquidos. In: CEREDA, M. P. (Coord.) **Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca**. São Paulo: Fundação Cargill, 2001. v. 4, cap. 13, p. 186-201.

FELIPE, F. I.; RIZATO, M.; WANDALSEN, J. V. **Potencial econômico dos resíduos de mandioca proveniente de fecularias no Brasil**. In: 47º CONGRESSO SOBER – Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto alegre: SOBER, 2009.

FORESTI, E. **Notas da aula de Processos e Operações em Tratamento de Resíduos SHS-705**. Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 1998.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEI, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. In.: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**. 1ª ed. Rio de Janeiro: RiMa Artes e Textos, p.29-52. 1999.

FRIEDL, A.; PADOUVAS, E.; ROTTER, H; VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. **Analytica Chimica Acta**, v. 544, p.191-198, 2005.

GUIMARÃES, C. E.; TEIXEIRA, C. E.; CIRANI, C. B. S.; SANTOS, M. R. Avaliação do Desempenho Ambiental do Aproveitamento do Biogás em Fecularias de Mandioca no Estado do Paraná. **Desenvolvimento em Questão**, v. 15, n. 39, p. 171-202, 2017.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Taubaté, Taubaté-SP.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.]. 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2019.

JIRAPRASERTWONG, A.; MAITRIWONG, K.; CHAVADEJ, S. Production of biogas from cassava wastewater using a three-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. **Renewable Energy**, v. 130, p. 191-205, 2019.

KUCZMAN, O.; TAVARES, M. H. F.; GOMES, S. D.; GUEDES, L. P. C.; GRISOTTI, G. Effects of stirring on cassava effluent treatment in an anaerobic horizontal tubular pilot reactor with support medium – A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 984-989, 2017.

KUNZLER, K. R.; Gomes, S. D.; Piana P. A.; Torres, D. G. B.; Vilas Boas, M. A.; TAVARES, M.H. F. Anaerobic reactors with biofilter and different diameter-length ratios in cassava starch industry wastewater treatment. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 612-624, 2013.

LANTZ, M.; SVESSON, M.; BJÖRNSSON L.; BJÖRNSSON, P. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-Incentives, barriers and potentials. **Energy Policy**, v. 35, p. 1830-1840, 2006.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P. Avaliação técnico-econômica da produção de etanol de farelo de mandioca, utilizando pectinase como enzima complementar. **Energia na Agricultura**, v. 13, n. 2, p. 1-14, 1998.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. Editora Interciência, vol. 1, Rio de Janeiro, 2012.

LU, F.; JIANG, Q.; QIAN, F.; ZHOU, Q.; JIANG, C.; SHEN, P. Semi-continuous feeding combined with traditional domestication improved anaerobic performance during treatment of cassava stillage. **Bioresource Technology**, v. 291, p. 1-7, 2019.

MAFACIOLLI, D. **Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia utilizando dejetos de aves de postura com suplementação de glicerina bruta**. 2012. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Centro Universitário UNIVATES, Lajeado.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015.

MEIER T. R. W. **Otimização do processo de biodigestão anaeróbia a partir da mistura de água residual de suinocultura, vinhaça e glicerol bruto**. 2016. 70 f. Mestrado (Tecnologia de Bioprodutos Agroindustriais), Universidade Federal do Paraná, Palotina-PR.

MARQUEZAN, L. H. F.; BRONDANI, G. **Análise de investimentos**. Revista Eletrônica de Contabilidade (Descontinuada), v. 3, n. 1, p. 35, 2006.

NOGUEIRA, E. **Análise de investimento**. In: BATALHA, M. O. (Coord). *Gestão agroindustrial*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007. p. 205-266.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes (bovina e suína)**. José Wagner Pacheco. São Paulo: CETESB, 2006.

PAWLOSKY, U., RODA L.S.A., TOSIN, M., HEISLER, I. **Curso de tratamento de efluentes industriais: industrialização de mandioca**. Curitiba. Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente, 1991. 126p.

PATIL, P. N.; GOGATE, P. R.; CSOKA, L.; DREGELYI-KISS, A.; HORVATH, M. Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 30, p. 79–86, 2016.

PENTEADO, E. D.; LAZARO, C. Z.; SAKAMOTO, I. K.; ZAIAT, M. Influence of seed sludge and pretreatment method on hydrogen Production in packed-bed anaerobic reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 14, p. 6137-6145, 2013.

RIBAS, M. M. F. **Comparação da estabilização da manipueira com calcário e hidróxido de sódio na fase acidogênica da biodigestão anaeróbia e uso de biofertilizante**. 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas UNESP, Botucatu-SP.

RIZZONI, L. B.; TOBIAS, A. C. T.; DEL BIANCHI, M.; GARCIA, J. A. D. Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, v. 9, n. 18, p. 1-20, 2012.

SAMANEZ, C. P. **Engenharia Econômica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTOS, R. F.; SIQUEIRA, C. A. J. **Fontes Renováveis: Agroenergia**, vol. 1, Editora ABEU, Cascavel, 2012.

SEAB – Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Prognóstico da mandioca 2017/2018. Disponível em: http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2018/Mandioca_2017_18.pdf. Acesso em: 05 out. 2018.

SEAB - Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. **ANÁLISE DA CONJUNTURA AGROPECUÁRIA MANDIOCA - SAFRA 2015/16**. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2016/mandioca_2015_16.pdf>. Acesso em: 02 out. 2018.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente. 2008. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/inicial>>. Acesso em: 03 jul. 2019.

SILVA A. D. **análise de viabilidade econômico-financeirana geração de energia a partir de resíduos do processamento da mandioca** 2014. 70 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2014.

SILVA A. R.; CIRANI. C. B. S. **Viabilidade econômica e benefícios ambientais de tecnologia aplicada a biodigestores em empresas processadoras de mandioca do Paraná**. Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios, Florianópolis, v.9, n.3, set./dez. 2016.

SOUZA, G.T.; CELLA, R.F.; SÁ, S.H. **Tratamento Anaeróbio de Efluentes**. Florianópolis, 2007.

TEIXEIRA, V. H. **Fontes Alternativas de Energia biogás**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.

TORRES, D. G. B. **Meios suporte no tratamento anaeróbio da manipueira**. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. **Revista da Sociedade de Cardiologia do Estado do Rio de Janeiro**, v. 20, n. 5, p. 383-386, 2007.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

ANEXOS

ANEXO 1 – ENERGIA EM KCAL DO CAVACO E BIOGÁS

TABELA 16 - ENERGIA EM KCAL DO CAVACO E BIOGÁS / DIA

COMBUSTÍVEL (DIA)	CAVACO	BIOGÁS
VOLUME	22004,9 kg	1.667,19 m ³
PODER CALORÍFICO	100.765.938,3 (kcal/kg)	9.169.578,90 (kcal/m ³)

FONTE: O autor (2019)

ANEXO 2 – RESÍDUOS DE SÓLIDOS TOTAIS

TABELA 17 - RESÍDUOS SÓLIDOS TOTAIS

	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Trat. 1	5,46	10,31	6,01	2,69	10,085	3,95	4,02
Trat. 2	2,485	3,53	2,485	1,135	2,11	1,605	3,855
Trat. 3	2,25	3,015	2,19	1,225	2,415	0,865	1,84
Média (%)	58,79	70,8	63,56	55,39	76,19	78,22	54,22

FONTE: O autor (2019)

ANEXO 3 – RESÍDUOS DE SÓLIDOS VOLÁTEIS

TABELA 18 – RESÍDUOS SÓLIDOS VOLÁTEIS

	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
A. 1	3,99	8,58	4,36	1,16	5,87	1,59	3,42
A. 2	2,65	1,79	1,3	0,23	1,03	0,59	1,47
A. 3	1,79	2,57	0,72	0,69	0,85	0,17	0,37
Média (%)	55,13	70,86	83,48	40,51	85,51	89,3	89,18

FONTE: O autor (2019)

ANEXO 4 – REMOÇÃO DE DQO

TABELA 19 – REMOÇÃO DE DQO

	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
A. 1	2469	3424	3110	1524	2251	1702	1784
A. 2	1706	1447	780	1046	996	663	677
A. 3	167	345	335	349	245	188	224
Média (%)	93,23	89,92	89,22	77,09	89,11	88,95	87,44

FONTE: O autor (2019)