

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Estudo Teórico da Viabilidade Energética e Econômica a Partir da Conversão de Vinhaça a Biogás Produzida no Brasil

Autora: Livia Melo de Moura
Orientadora: Prof^a Dr^a Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Brasília, DF
2022



Lívia Melo de Moura

**Estudo Teórico da Viabilidade Energética e Econômica a
Partir da Conversão de Vinhaça a Biogás Produzida no
Brasil**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia de Energia da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof^a Dr^a Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Brasília, DF

2022

Lívia Melo de Moura

Estudo Teórico da Viabilidade Energética e Econômica a Partir da Conversão de Vinhaça a Biogás Produzida no Brasil/ Lívia Melo de Moura. – Brasília, DF, 2022- 77 p. : il.; 30 cm.

Orientador: Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Vinhaça. 2. Biogás. I. Prof^ª Dr^ª Roseany de Vasconcelos Vieira Lopes.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo Teórico da Viabilidade Energética e Econômica a Partir da Conversão de Vinhaça a Biogás Produzida no Brasil

CDU Classificação

Lívia Melo de Moura

Estudo Teórico da Viabilidade Energética e Econômica a Partir da Conversão de Vinhaça a Biogás Produzida no Brasil

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

**Prof^a Dr^a Roseany de Vasconcelos
Vieira Lopes**
Orientadora

Prof^a Dr^a Andréia Alves Costa
UnB/FGA
Convidado 1

Prof. Dr. Rudi Henri van Els
UnB/FGA
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me proporcionar participar desse curso e dessa Universidade, a Ele que me concede sabedoria e paciência para continuar na busca por meus objetivos.

À minha mãe, Lélya Melo de Aguiar, minha maior incentivadora, por me dar todo suporte necessário em todos os momentos da minha vida, principalmente para que eu pudesse concluir o curso e este trabalho, compreendendo minha ausência enquanto me dedicava à faculdade.

À minha irmã, Lílian Melo, que sempre me apoia e me incentiva na busca por meus sonhos, me ajudando e me acolhendo nas situações necessárias.

À minha família, tios, primos e namorado, por acreditarem e confiarem em mim, sempre com palavras de ânimo e encorajamento.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo companheirismo e acolhimento nos momentos difíceis e também felizes, por toda troca de experiências, aprendizado e amizade, vocês foram essenciais durante essa caminhada.

À professora Roseany, por sua orientação durante a realização deste trabalho, de forma profissional, dedicada e humana, sempre querendo o melhor de seus alunos.

Aos professores, por todo aprendizado, conselho, paciência e ajuda durante minha graduação.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste e de muitos outros trabalhos durante minha jornada acadêmica.

A todos vocês, meu muito obrigada!

*"O silêncio fala muito, e não comete erros.
Para cada sofrimento seu, para cada dor, lembre-se:
Você é mais forte tendo fé.
Felizes aqueles que acreditam de verdade, eles nunca estarão sozinhos."
(Guilherme de Sá)*

Resumo

O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de etanol. Dessa forma, a indústria sucroalcooleira se faz presente com forte impacto na economia do país. No entanto, também se torna responsável pela enorme geração de resíduos provenientes dessa produção. Este trabalho traz um levantamento teórico acerca da viabilidade energética e econômica da produção de biogás a partir da vinhaça. Sabe-se que a vinhaça é amplamente utilizada para fertirrigação nas lavouras, porém ela carrega um alto potencial poluidor. Nesse sentido, se estuda a biodigestão anaeróbia desse resíduo como alternativa sustentável para redução de sua carga poluidora, sendo uma alternativa para gerar energia limpa. As finalidades para o biogás estão entre geração de energia térmica, elétrica e veicular (biocombustível), expandindo a matriz energética brasileira. A partir dos resultados obtidos é possível destacar que o uso do biogás da vinhaça na geração de energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento energético do país, porém apenas 2,17% do potencial nacional está sendo devidamente aproveitado, com regiões com grandes potenciais energéticos para serem explorados. Também foi verificado que a implementação de seu processo é economicamente viável devido ao valor agregado na venda final da energia. Além disso, o uso dessa tecnologia está atrelado a redução das emissões de GEE, apoiando assim, o desenvolvimento sustentável do Brasil.

Palavras-chaves: Vinhaça; Biogás; Biodigestão Anaeróbia; Etanol.

Abstract

Brazil is among the world's largest producers of ethanol. In this way, the sugar and ethanol industry is present with a strong impact on the country's economy. However, it also becomes responsible for the huge generation of waste from this production. This work brings a theoretical survey about the energetic and economic viability of biogas production from vinasse. It is known that vinasse is widely used for fertigation in crops, but it carries a high polluting potential. In this sense, the anaerobic digestion of this residue is studied as a sustainable alternative to reduce its polluting load, being an alternative to generate clean energy. The purposes for biogas are among the generation of thermal, electrical and vehicular energy (biofuel), expanding the Brazilian energy matrix. From the results obtained, it is possible to highlight that the use of vinasse biogas in the generation of electric energy is fundamental for the energy development of the country, but only 2.17% of the national potential is being properly used, with regions with great energy potential. to be explored. It was also verified that the implementation of its process is economically viable due to the added value in the final sale of energy. In addition, the use of this technology is linked to the reduction of GHG emissions, thus supporting the sustainable development of Brazil.

Key-words: Vinasse; Biogas; Anaerobic Biodigestion; Ethanol.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comparação do consumo de energia por fontes renováveis e não renováveis.	17
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira de 2019.	18
Figura 3 – Processo produtivo do etanol de 1 ^a geração.	21
Figura 4 – Processo produtivo do etanol de 2 ^a geração.	23
Figura 5 – Subprodutos gerados durante o processo de produção do bioetanol.	25
Figura 6 – Vinhaça.	26
Figura 7 – Diagrama de fluxos do cenário 1.	31
Figura 8 – Diagrama de fluxos do cenário 2.	32
Figura 9 – Diagrama de fluxos do cenário 3.	33
Figura 10 – Diagrama de fluxos do cenário 4.	33
Figura 11 – Diagrama de fluxos do cenário 5.	34
Figura 12 – Potencial brasileiro de biogás.	37
Figura 13 – Potencial nacional de biogás bruto.	38
Figura 14 – Processo de degradação da matéria orgânica para a produção de biogás.	39
Figura 15 – Etapas do processo da digestão anaeróbia.	40
Figura 16 – Faixa ótima de temperatura dos microrganismos na digestão anaeróbia.	42
Figura 17 – Impermeabilização de biodigestor.	44
Figura 18 – Biodigestor modelo indiano.	45
Figura 19 – Biodigestor modelo chinês.	46
Figura 20 – Biodigestor modelo canadense.	47
Figura 21 – Reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB ou RAFA).	47
Figura 22 – Produção teórica de biogás e metano para vinhaça.	58
Figura 23 – Custo de fabricação e produtividade de energia elétrica.	62
Figura 24 – Potencial de geração eletricidade da vinhaça por município do estado (SP).	64
Figura 25 – Potencial econômico para geração de energia elétrica a partir da vinhaça utilizando Valor Presente Líquido, por município do estado (SP).	65
Figura 26 – Mapa do custo unitário da energia elétrica gerada a partir da vinhaça por município do estado de São Paulo.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos da vinhaça.	28
Tabela 2 – Diferença de DBO de alguns efluentes.	29
Tabela 3 – Composição do Biogás	36
Tabela 4 – Dados regionais de biogás no Brasil.	38
Tabela 5 – Palavras-chave utilizadas nas ferramentas de busca.	51
Tabela 6 – Pesquisa realizada na revista eletrônica Cadernos de Prospecção e na biblioteca eletrônica Scielo.	52
Tabela 7 – Pesquisa realizada no Portal de Periódico Capes e ScienceDirect.	53
Tabela 8 – Preço de viabilidade econômica em relação a capacidade produtiva da usina.	55
Tabela 9 – Parâmetros de entrada e dados de produção da usina.	57
Tabela 10 – Produção teórica de biogás para vinhaça.	58
Tabela 11 – Parâmetro técnico calculado para eletricidade gerada a partir da vinhaça.	59
Tabela 12 – Emissões de GEE evitadas.	59
Tabela 13 – Condições adotadas para o estudo de caso.	60
Tabela 14 – Discriminação dos custos utilizados.	61
Tabela 15 – Valor da venda anual da eletricidade a partir da vinhaça.	61
Tabela 16 – Análise estatística da geração de energia elétrica por município de São Paulo.	64
Tabela 17 – Comparação dos resultados dos <i>cases</i> estudados.	69

Lista de abreviaturas e siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ABIOGÁS	Associação Brasileira do Biogás
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
PVC	Policloreto de vinil
pH	Logaritmo negativo (na base 10) da atividade do íon hidrônio
SIN	Sistema Interligado Nacional
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRC	Tempo de Retenção Celular
THR	Tempo de Retenção Hidráulico
VLP	Valor Presente Líquido
VB	Volume do Biodigestor
VC	Volume da Carga

Lista de símbolos

H_2S	Ácido Sulfídrico
NH_3	Amônia
CO_2	Dióxido de Carbono
P	Fósforo
H_2	Hidrogênio
J/m^3	Unidade de pressão - Joule por metro cúbico
MWh	Megawatt-hora
CH_4	Metano
Mo	Molibdênio
CO	Monóxido de Carbono
Ni	Níquel
N_2	Nitrogênio
O_2	Oxigênio
H_2S	Sulfeto de Hidrogênio
TWh	Terawatt-hora
Nm^3	Unidade de vazão - Normal Metro Cúbico
USD/US\$	<i>United States Dollar</i> - Moeda Americana

Sumário

	Introdução	14
1	OBJETIVOS	16
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Expansão da produção de fontes alternativas	17
2.2	Produção de biocombustíveis no Brasil	18
2.2.1	Etanol	19
2.2.1.1	Produção Mundial	20
2.2.1.2	Produção Nacional	20
2.2.1.3	Processo de Produção	20
2.2.1.3.1	Etanol de 1ª Geração	21
2.2.1.3.2	Etanol de 2ª Geração	23
2.2.1.4	Capacidade das Usinas Produtoras	24
2.2.2	Geração de Resíduos	24
2.3	Vinhaça	25
2.3.1	Definição	25
2.3.2	Propriedades físicas e químicas	26
2.3.3	Métodos de tratamento	30
2.3.4	Utilização da vinhaça no Brasil	34
2.4	Biogás	35
2.4.1	Definição	35
2.4.2	Potencial de produção de biogás no Brasil	36
2.4.3	Obtenção do biogás: biodigestão anaeróbia	38
2.4.4	Fatores que interferem na biodigestão	41
2.4.5	Biodigestores/reatores para produção de biogás	44
2.4.6	Vantagens da biodigestão	48
3	METODOLOGIA	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Estudo de Casos do Uso da Vinhaça para Geração de Eletricidade	54
4.1.1	Case I: Viabilidade Econômica Financeira	54
4.1.1.1	Resultados	54

4.1.1.2	Discussão	56
4.1.2	Case II: Avaliação Tecno-econômica da Produção de Bioenergia	56
4.1.2.1	Resultados	57
4.1.2.2	Discussão	62
4.1.3	Case III: Análise Econômica do Biogás no Estado de São Paulo	63
4.1.3.1	Resultados	63
4.1.3.2	Discussão	67
4.2	Análise dos Cases	68
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

Introdução

O setor industrial sucroalcooleiro contribui para o aumento da economia no país, com a geração de milhões de empregos, e com isso, se tornou um dos maiores ramos do agronegócio nacional (COSTA, 2014). Com a criação do Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL), e a expansão da indústria sucroalcooleira do país, ocorreu um aumento significativo de produção de etanol, e conseqüentemente da geração de vinhaça, promovendo um crescimento significativo neste setor (LORA; VENTURINI, 2012).

Em 2019 foram produzidos mais de 32 bilhões de litros de etanol no Brasil, segundo país com a maior produção do mundo (VIDAL, 2020). E com a expansão dessa produção os resíduos gerados a partir desse processo também aumentaram. Sendo assim, novas tecnologias e eficientes formas de descarte estão sendo pesquisadas para que se reduzam os impactos ambientais e se consiga produzir energia a partir desses resíduos (COSTA, 2014).

Para a produção de etanol se utiliza-se o caldo da cana-de-açúcar, e após a destilação é obtida a vinhaça, o principal resíduo dessa produção. Considerando que, para cada litro de etanol são gerados de 10 a 20 litros de vinhaça e este é um material orgânico rico em potássio, cálcio e magnésio, é utilizada como fertilizante de forma excessiva no país (SILVEIRA, 2015).

A vinhaça pode ser utilizada como fertilizante nas lavouras, porém o uso indiscriminado desta causa graves danos ambientais, tais como a contaminação do lençol freático, a lixiviação, a emissão de gases do efeito estufa e a liberação de mau cheiro. Uma vez que este é tido como o meio de descarte mais simples e economicamente viável, se faz necessárias outras vias de alternativas sustentáveis para uso e disposição final desse material (SILVEIRA, 2015).

Com a busca de novos usos para a vinhaça foi descoberta a geração de biogás proveniente da digestão anaeróbia em reatores de alto desempenho. Além do biogás, com a queima da vinhaça é possível transformar o gás produzido em eletricidade e em gás natural (PINTO et al., 1999).

O biogás é obtido pelo processo de digestão anaeróbia que ocorre pela decomposição da matéria orgânica com ausência de oxigênio, transformando essa matéria em uma mistura de gases composta principalmente por metano, um gás com elevado potencial energético, tornando o biogás uma fonte renovável de energia (COSTA, 2014).

Para a produção do biogás utilizando a vinhaça, é possível reduzir o poder poluente da matéria orgânica, uma vez que, ao passar pelo reator é feita uma redução da sua

quantidade de demanda bioquímica de oxigênio, processo que viabiliza a utilização de um subproduto, minimizando os efeitos negativos ao meio ambiente, como acúmulo e contaminação do solo e cursos d'água (COSTA, 2014).

Tendo em vista a necessidade da utilização adequada e sustentável da vinhaça, este trabalho visa analisar a produção de biogás a partir da vinhaça obtida no Brasil, com a finalidade de reduzir a carga poluidora que essa matéria orgânica traz ao meio ambiente quando utilizada de forma equivocada.

1 Objetivos

1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo teórico acerca da viabilidade energética e econômica utilizando biogás advindo da conversão da vinhaça produzida no Brasil.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico que contemple aspectos relacionados à vinhaça e ao biogás;
- Fazer uma triagem do material que trata especificamente dos artigos com os tópicos de interesse;
- Estudo sobre o processo de produção de etanol e seus resíduos;
- Trazer, ao trabalho dados reais sobre estados que possuem relevância na produção de etanol no Brasil;
- Trazer uma análise de viabilidade econômica da utilização do biogás a partir da vinhaça na geração de energia elétrica no país;

2 Referencial Teórico

2.1 Expansão da produção de fontes alternativas

As fontes alternativas podem substituir as fontes convencionais, pois são produtoras energéticas que não utilizam derivados de petróleo e outros combustíveis fósseis para a geração de energia. As energias derivadas de recursos naturais se renovam a cada período de tempo podendo ser utilizadas livremente sem que a mesma se esgote. Existem fontes alternativas e não renováveis, em que após longo prazo podem ser esgotadas com seu uso excessivo, a fonte de energia nuclear é um exemplo dessa condição (SOLAR, 2021).

A demanda por fontes alternativas de energia produzidas de recursos naturais renováveis vem crescendo de acordo com as tecnologias que dispõem dessas fontes sendo estimáveis por suas vantagens econômicas, sociais e principalmente ambientais. A energia renovável é a que possui condições naturais de reposição em um curto período de tempo (MICUANSKI et al., 2014).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) a matriz energética do Brasil possui mais energia proveniente de fontes renováveis do que é a matriz mundial. É importante salientar que o uso de fontes não renováveis está ligado diretamente à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), assim como algumas fontes (como etanol e biodiesel) as emissões de fontes renováveis possuem um padrão de emissões bastante diferente, como por exemplo ausência de compostos contendo enxofre, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dentre outras substâncias tóxicas, quando comparadas a de fontes de origem fóssil. Na Figura 1 é apresentada a comparação do consumo de energia pelo Brasil em relação ao mundo.

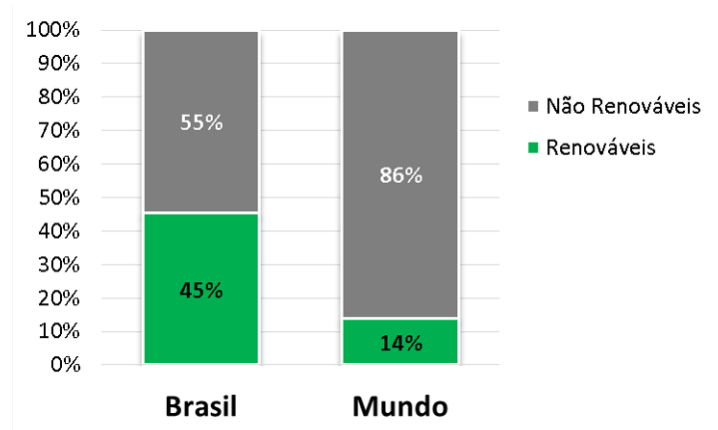


Figura 1 – Comparação do consumo de energia por fontes renováveis e não renováveis.
Fonte: EPE (2021).

Logo, é possível concluir que o Brasil emite menos GEE por habitante que a maioria dos outros países. Ainda que o consumo de energia a partir de fontes não renováveis seja maior do que o de renováveis, quase metade da matriz brasileira é formada por fontes renováveis, com grande potencial de expandir essa quantidade nos próximos anos. Por meio da Figura 2 é possível observar o percentual de todas as fontes de energia do Brasil.

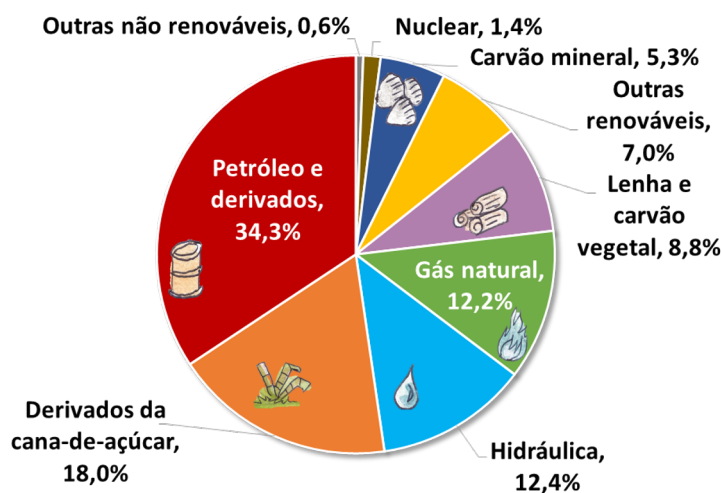


Figura 2 – Matriz Energética Brasileira de 2019.
Fonte: EPE (2021).

Em 2019, o total de energia disponibilizada no Brasil registrou um aumento de 1,4% em relação a 2018. O avanço das ofertas das energias alternativas contribuíram para que a matriz energética brasileira permaneça em um nível de renovabilidade superior. O acréscimo das energias solar e eólica na geração de energia elétrica, além da oferta de biomassa da cana e biodiesel tem avançado nos últimos anos favorecendo que o país se mantenha com a matriz mais renovável do mundo. (EPE, 2020).

A biomassa é tida como uma fonte renovável, uma vez que possui sua reposição natural sem grandes dificuldades e em períodos relativamente curtos, em alguns anos ou até menos. Sendo diferente dos combustíveis fósseis, que sua reposição natural se dá em milhares de anos e deve ser feita em condições específicas (MICUANSKI et al., 2014).

Através da biomassa a cana-de-açúcar se apresenta como uma das fontes mais promissoras para gerar energia. No entanto, o processo de transformação da cana-de-açúcar em açúcar e etanol produz uma grande quantidade de resíduos, principalmente o bagaço e a vinhaça. Em consequência disso surge a necessidade de sistemas que transformem esses resíduos em fontes alternativas de energia (MICUANSKI et al., 2014).

2.2 Produção de biocombustíveis no Brasil

O Brasil desempenha um papel importante no cenário mundial de produção e uso de biocombustíveis, principalmente no que se refere ao etanol produzido a partir da

cana-de-açúcar e ao biodiesel derivado de óleo vegetal ou gordura animal. Os principais mercados para biocombustíveis no mundo são: a União Européia, seguida dos Estados Unidos e do Brasil. Além desses países, a China é um importante mercado para o etanol, enquanto a Argentina e a Indonésia são importantes mercados para o biodiesel (VIDAL, 2019).

O mundo ainda depende fortemente de combustíveis fósseis, apesar das crescentes preocupações sobre os efeitos nocivos de seu uso dessas substâncias ao planeta. Os biocombustíveis são biodegradáveis, possuindo baixo teor de enxofre e compostos aromáticos, causando menor impacto no meio ambiente do que os combustíveis fósseis (ANP, 2018).

Dessa forma, os biocombustíveis são alternativas vantajosas para a substituição, mesmo que parcial, dos combustíveis derivados do petróleo e do gás natural em motores à combustão, uma vez que o segmento de transporte é responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa.

Tendo início nos anos 70, as políticas energéticas do país foram fundamentais para a introdução do álcool e do biodiesel na matriz energética brasileira, visando assegurar a produção do biocombustível, com enfoque em uma política de inclusão social (VIDAL, 2019). A seguir pode-se acompanhar um breve síntese sobre a produção de etanol no Brasil.

2.2.1 Etanol

O Brasil apresenta um avanço na tecnologia e produção de álcool de cana-de-açúcar, sendo o país que deu início na utilização do etanol em grande escala como combustível. A mistura de etanol à gasolina no Brasil já é superior a 20% há algumas décadas. Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP) na resolução N^o 19/2015 a definição de etanol é:

“Biocombustível proveniente do processo fermentativo de biomassa renovável, destinado ao uso em motores a combustão interna, e possui como principal componente o etanol, o qual é especificado sob as formas de Etanol Anidro Combustível e Etanol Hidratado Combustível” (ANP, 2015).

Em meados dos anos 2000, as mudanças constantes no mercado do petróleo ajudaram no avanço da pesquisa e tecnologia no setor automotivo, resultando no lançamento dos veículos com motores de sistema *flex-fuel* com o consecutivo aumento de demanda por etanol e crescente investimento no setor. A criação dessa tecnologia mexeu com a dinâmica do mercado, já que não expõe o consumidor ao risco da falta de oferta de etanol. Associado a isso, com o apoio do Estado houve mais investimentos na produção de etanol (VIDAL, 2019).

2.2.1.1 Produção Mundial

Os países à frente da produção mundial de etanol são EUA (52,0%) e Brasil (25,0%), sendo o milho (67,0%) a principal matéria-prima utilizada nessa produção, o restante é produzido basicamente a partir da cana-de-açúcar. Os Estados Unidos além de maiores produtores são também maiores consumidores mundiais de etanol. Com unidades de biorrefinarias em construção, sua capacidade total chegará a 63 bilhões de litros de etanol produzidos por ano (VIDAL, 2019).

Grande parte do etanol importado dos EUA para o Brasil tem sido destinada ao mercado do Nordeste, onde a competitividade do etanol é menor em relação às demais regiões do país, em razão de questões tributárias e logísticas. Em 2018, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Paraná foram responsáveis por cerca de 84% das vendas de etanol no país (ANP, 2020).

2.2.1.2 Produção Nacional

O percentual obrigatório de mistura do etanol na gasolina é de 27%, desde 2015 e com o mercado da tecnologia dos carros *flex* o Brasil também se destaca mundialmente, uma vez que estes fazem uso de qualquer percentual de gasolina e etanol hidratado. Para a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2020) o etanol é configurado como:

"O etanol representa uma fonte de energia limpa e renovável, com grande importância para a sustentabilidade ambiental. Desde o lançamento dos veículos flex até o início de 2019, o uso do etanol no Brasil evitou a emissão de 535 milhões de toneladas de CO₂ equivalente na atmosfera. No entanto, a tendência mundial é de crescimento do mercado de carros elétricos, portanto, um dos grandes desafios para o setor será desenvolver, consolidar a tecnologia de célula de combustível a etanol que seja competitiva frente a outras tecnologias já disponíveis".

Uma das principais matérias-primas utilizada no Brasil para a produção de etanol é a cana-de-açúcar, que em condições climáticas favoráveis, como áreas quentes e tropicais, possui maior produtividade das safras. Em 2019, o consumo final de etanol apresentou um aumento de 11,1%, sendo que o preço relativo do açúcar favoreceu o etanol, alterando a produção na indústria sucroenergética com impactos sobre a competitividade do etanol hidratado frente à gasolina C (gasolina A + etanol anidro). Já o consumo final de biodiesel aumentou 9,3% (EPE, 2020).

2.2.1.3 Processo de Produção

No Brasil, a produção do etanol não se baseia apenas no açúcar da cana (conhecido como etanol de primeira geração ou 1G), pois o seu bagaço também é utilizado na produção de bioetanol (etanol de segunda geração ou 2G). O processamento da cana-de-açúcar

para a produção de etanol 1G consiste nas etapas representadas na Figura 3 e descritas adiante.

2.2.1.3.1 Etanol de 1ª Geração



Figura 3 – Processo produtivo do etanol de 1ª geração.

Fonte: PROPEQ (2020a).

Lavagem

A partir do momento em que a cana-de-açúcar é trazida das plantações até a usina, é indispensável realizar sua lavagem. Nesse processo são retiradas as impurezas mais grosseiras, como: areia, terra e poeira. Após isso, ela pode ser picada e passar por um eletroímã, para retirar resquícios metálicos que possam existir (PROPEQ, 2020a).

Moagem

Em seguida, ela é encaminhada para a moagem, onde a cana é moída por trituradores, produzindo um líquido chamado melado. Cerca de 70% da massa original da cana está presente nesse caldo, já os outros 30%, que não foram aproveitados, passam a compor o bagaço, este pode ser utilizado na geração de energia elétrica na usina (NOVO, 2016).

Peneiramento

Após a cana passar pela moagem, é preciso realizar o peneiramento de todo o caldo, o qual ainda pode conter impurezas que surgem de etapas anteriores. Assim, costuma-se realizar uma separação mecânica das partículas sólidas restantes com a utilização de peneiras hidrociclones (NOVO, 2016).

Caleação

Posteriormente, o caldo passa para o tanque de calagem, onde é misturado com leite de cal (solução básica de hidróxido de cálcio), ocasionando a floculação e decantação de impurezas. O aumento do pH do caldo eleva sua ação corrosiva contra os equipamentos e ajuda na eliminação de microorganismos que não são desejados. Porém, leva também a uma diminuição do teor nutricional do caldo, prejudicando a cultura de leveduras que fará a fermentação. Dessa forma, é preciso manter o controle adequado do pH no tanque, com estudos indicando uma faixa entre 5,6 e 5,8 (PROPEQ, 2020a).

Aquecimento

Logo após a caleação, o caldo é colocado em uma temperatura de aproximadamente 105° C, eliminando assim, microorganismos sensíveis ao calor. Neste ponto, diferentes tipos de trocadores de calor podem ser utilizados. Após o aquecimento, o caldo passa para uma das etapas finais do tratamento: a decantação (PROPEQ, 2020a).

Decantação

Nesta etapa, o líquido é movido para um tanque para repousar. Com o tempo, as partículas mais densas vão se acumulando no fundo pela ação da gravidade e o melado puro pode ser retirado, conhecido como caldo clarificado. Nessa operação costuma-se levar 3 horas em destilarias, visando a mínima remoção de nutrientes (NOVO, 2016).

Resfriamento

Em seguida, o caldo que é nomeado clarificado costuma passar por um processo de resfriamento, para chegar a sua temperatura ideal de alimentação nas dornas de fermentação, que é considerada 30°C (PROPEQ, 2020a).

Preparo do mosto e do fermento

Com o caldo clarificado, é preciso transformá-lo em mosto, que consiste em corrigir a concentração de açúcares por meio da diluição, além de ajustar o pH para a faixa entre 4,5 e 5. Nesse momento também pode ser feita a adição de anti-sépticos. Assim, é realizado o preparo do fermento, que consiste no cultivo de leveduras, conhecido também como de pé-de-cuba (BARROS; BLUM, 2018).

Fermentação

Nessa etapa finalmente o álcool será produzido, juntamente com o CO_2 . É válido destacar que o etanol surge como resultado da reação de fermentação alcoólica, feita pelas leveduras da espécie *Saccharomyces Cerevisiae*, presentes no fermento. Ao final desse processo, que costuma durar algumas horas e varia conforme o tamanho do tanque, é obtido o vinho bruto/fermentado (BARROS; BLUM, 2018).

Destilação

Tendo em vista que o álcool é o objetivo principal desta produção, nesse momento se faz necessário separar o etanol do vinho bruto. Para isso, utiliza-se ao menos duas operações de destilação, a depuração e outra destilação, a qual produz o flegma (corrente composta de água e álcool) e a vinhaça (BARROS; BLUM, 2018).

Retificação e Desidratação

Após a coleta do flegma, ainda é necessária a retificação para separar o álcool superior, para que sua concentração atinja o teor alcoólico do etanol absoluto (97%). Por fim, executa-se a desidratação (PROPEQ, 2020a). Com isso, o álcool é transformado em

etanol anidro (99,9%), que pode ser acrescentado à gasolina comercializada aumentando sua octanagem. Vale ressaltar que o etanol comum vendido é o etanol hidratado.

Armazenamento e transporte

O etanol está finalmente pronto para ser comercializado. Portanto, é necessário armazená-lo e transportá-lo até seu destino de acordo com as normas de segurança adequadas. Deve-se lembrar que os resíduos são gerados em vários momentos do processo, que devem ser reaproveitados para mitigar seu impacto no meio ambiente (PROPEQ, 2020a).

2.2.1.3.2 Etanol de 2ª Geração

Também chamado de bioetanol, o etanol 2G é um biocombustível produzido a partir dos resíduos descartados do processo de produção do etanol 1G, tendo destaque para a palha e o bagaço da cana-de-açúcar que são dispensados em maior quantidade. Seu processo produtivo está representado na Figura 4.



Figura 4 – Processo produtivo do etanol de 2ª geração.

Fonte: PROPEQ (2020b).

De acordo com PROPEQ (2020b), o processo de produção do etanol 2G é semelhante em muitas etapas ao do etanol 1G. As matérias-primas ricas em glicose, como a cana, sofrem fermentação alcoólica para converter o açúcar em álcool. No entanto, embora o caldo da cana seja uma matéria-prima rica em glicose, o seu bagaço é rico em celulose (carboidrato complexo presente em sua estrutura) que não pode ser metabolizado pelas bactérias utilizadas na produção comum de etanol.

Nesse sentido, o objetivo principal da produção do etanol 2G é produzir álcool de forma indireta, a partir da celulose, convertendo-a em substâncias que podem ser fermentadas por leveduras por meio de substâncias químicas ou enzimáticas (PROPEQ, 2020b).

Tendo em vista que o etanol 1G é o mais utilizado no Brasil, e que este possui maior quantidade de resíduos descartados, o presente trabalho terá como enfoque apenas o seu processo produtivo. Porém, ressaltando que também se produz vinhaça do etanol 2G em uma quantidade menor e que deve haver mais estudos nessa área para um melhor aproveitamento do seu potencial energético.

2.2.1.4 Capacidade das Usinas Produtoras

De acordo com Ribeiro, Blumer e Horii (1999), o rendimento das usinas depende de alguns fatores, tais como: qualidade de cana, eficiência na lavagem da cana, preparação da cana para moagem, limpeza da moenda, a forma como é conduzido o processo fermentativo e principalmente do tratamento de caldo que deve ser feito cuidadosamente.

Segundo CONAB (2013), a proporção da cana-de-açúcar moída por indústrias é classificada de acordo com sua dimensão, onde:

- **destilaria de pequeno porte:** até 1 milhão de toneladas/safra
- **destilaria de médio porte:** até 5 milhões de toneladas/safra
- **estilaria de grande porte:** Acima de 5 milhões de toneladas/safra

Na safra de 2011/2012 foi processado um volume de 53,23% em unidades de pequeno e médio porte, enquanto que as unidades de maior porte, representaram 7,87% do total nacional de cana-de-açúcar moída. Este perfil da distribuição nacional está diretamente ligado à composição das unidades de São Paulo, que representam 61,5% de toda a cana-de-açúcar processada (CONAB, 2013).

2.2.2 Geração de Resíduos

Durante a produção de bioetanol da cana-de-açúcar é gerada uma quantidade elevada de resíduos, dentre eles estão: a vinhaça ou vinhoto, bagaço, torta de filtro e a água de destilação, que ao serem lançados em fontes hídricas, sem o devido tratamento, acarretam grave impacto ao meio ambiente (SILVA, 2015). Na figura 5 é representado o fluxograma desses resíduos.

De acordo com Bonassa et al. (2015) os principais subprodutos gerados na indústria alcooleira são:

- **palhagem:** derivada da cana-de-açúcar;
- **água de lavagem:** usada para o processamento industrial da cana-de-açúcar, para retirada de excessos de terra;
- **bagaço:** resíduo da etapa de extração do caldo de cana;
- **vinhaça e torta de filtro:** resíduos de alto potencial poluidor, gerados a partir da destilação (recuperação do álcool) e clarificação do mosto (para fermentação).

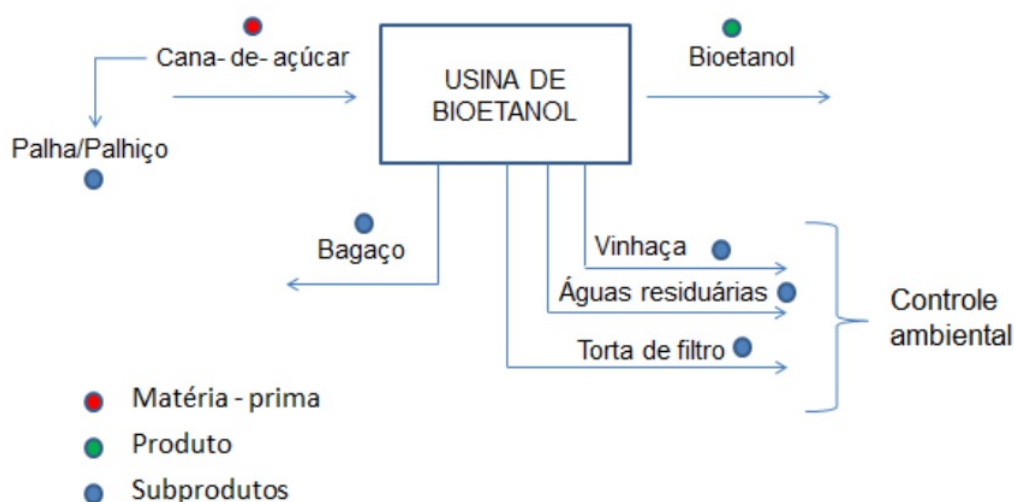


Figura 5 – Subprodutos gerados durante o processo de produção do bioetanol.
 Fonte: Bonassa et al. (2015).

Em 2013, a partir de 659 milhões de toneladas de cana-de-açúcar moída no Brasil, foram produzidos em torno de 27 bilhões de litros de etanol anidro e hidratado, 1,4 bilhão de litros de cachaça de cana-de-açúcar e 2,93 bilhões de litros de biodiesel (SEBRAE, 2008).

Considerando que para cada litro de etanol são produzidos cerca de 12 litros de vinhaça, e 1 litro de glicerol para cada 10 litros de biodiesel, pode-se dizer então que houve uma geração de aproximadamente 336 bilhões de litros de vinhaça da produção de etanol, 16,8 bilhões de litros de vinhaça da produção de cachaça e 293 milhões de litros de glicerol da produção do biodiesel de óleo vegetal e gordura animal (SILVA, 2015)

Desse modo, o total de bagaço e a vinhaça utilizados se transformam em matéria-prima para produção do terceiro produto da usina sucroalcooleira, a produção de calor e de energia elétrica, a fim de suprir a demanda energética da própria usina e o excesso que é comercializado com a concessionária de energia (SILVA, 2015).

Sendo assim, a viabilidade de alternativas para o tratamento dos resíduos desses complexos agroindustriais, se dá através da biodigestão anaeróbia, que além de reduzir a carga poluidora e os riscos ambientais, produzem o biogás. Este é utilizado como fonte de energia e para reciclagem da biomassa decomposta, rica em nutrientes (SILVA, 2015).

2.3 Vinhaça

2.3.1 Definição

A vinhaça conhecida também como vinhoto, água residual da destilaria ou restilo é um composto químico líquido originado a partir da destilação do mosto de fermentação

do álcool da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2007). É considerada uma suspensão líquida de sólidos orgânicos e minerais (Figura 6), bem como resíduos de açúcar, álcool, elementos do vinho que não são arrastados pela destilação e componentes orgânicos voláteis mais pesados (SILVA, 2015).



Figura 6 – Vinhaça.
Fonte: CAMPO (2020).

As propriedades da vinhaça dependem, sobretudo, da matéria-prima e das condições de operação da planta de produção de álcool. Sua qualidade depende do melão e do tipo de fermentação e destilação utilizados, da variedade e maturidade da cana-de-açúcar (PARSAEE et al., 2019).

A vinhaça é um líquido produzido por um retificador durante a produção de etanol e corresponde aproximadamente a 80% da matéria-prima utilizada nesta produção. Em tradicionais fábricas de álcool, para cada litro de álcool, são produzidos cerca de 20 litros de vinhaça. O Brasil é um dos maiores produtores de etanol do mundo, possuindo 50% do total mundial a partir da cana-de-açúcar (PARSAEE et al., 2019).

2.3.2 Propriedades físicas e químicas

Produzida por muitos países como subproduto da produção de álcool, a vinhaça é obtida a partir de matérias-primas diferentes, na América do Sul, por exemplo, utiliza-se principalmente a cana-de-açúcar e na Europa a beterraba (SILVA et al., 2007).

A vinhaça é o efluente de maior carga poluidora da indústria sucroalcooleira, apresentando uma Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) que varia de 20.000 a 35.000 $mg L^{-1}$. Nas destilarias são produzidos de 10 a 18 litros de vinhaça por litro de álcool, conforme as condições tecnológicas da destilaria. Nos equipamentos de destilação a temperatura que sai da vinhaça é de 85 a 90°C (SILVA et al., 2007).

De acordo com Gurgel et al. (2012) a preocupação atrelada a vinhaça está em sua

alta quantidade gerada e em sua decomposição química, sendo considerada um grave poluidor por ser um resíduo com alto teor de matéria orgânica e elementos minerais. Possui uma cor marrom-escura por causa da presença de polímeros que são demasiados recalcitrantes, isso significa, que possui alta persistência no solo e propriedades antioxidantes.

É um efluente extremamente poluidor que é produzido em alta escala nas refinarias do país. Por ser um resíduo que gera bastante volume, conseqüentemente há dificuldade em seu transporte e armazenamento (SOUZA, 2018).

Ao longo do processo industrial existem fatores que influenciam na composição da vinhaça, dentre os fatores de maior influência estão: o método de fermentação alcoólica, as espécies de leveduras empregadas, o tipo de tecnologia de destilação utilizado e a maneira de condução da destilação (LORA; VENTURINI, 2012).

É considerada uma suspensão aquosa de sólidos orgânicos e minerais, incluindo os componentes do vinho não arrastados durante a destilação, além de quantidades residuais de açúcar, etanol e compostos voláteis mais pesados. Sua composição média é aproximadamente 93% de água e 7% de sólidos, dos quais 75% são compostos orgânicos biodegradáveis e os outros 25% compõe uma fração mineral. (LORA; VENTURINI, 2012).

A matéria orgânica é o constituinte principal da vinhaça, presente sob a forma de ácidos orgânicos e por cátions como o potássio (K^{+1}), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e sódio (Na^{+1}). Sua riqueza nutricional é inerente à origem do mosto, ou seja, quando parte do mosto de melaço apresenta maiores concentrações em matéria orgânica, potássio, cálcio e magnésio; ao passo que esses elementos decaem consideravelmente quando se trata de mosto de caldo de cana, como é o caso de destilarias autônomas (ROSSETTO, 1987).

Composta por água, matéria orgânica e minerais, a vinhaça possui alto potencial de contaminação ambiental devido sua alta temperatura ao sair dos destiladores, seu baixo pH, sua alta corrosividade e altos índices de demanda química (DQO) e bioquímica de oxigênio (DBO), de onde advém seu potencial altamente poluidor de águas superficiais (SOUZA, 2018). Na Tabela 1 estão representados os parâmetros físicos e químicos desse resíduo.

Sua coloração escurece conforme é oxidada pela exposição ao ar. A decomposição da matéria orgânica contida na vinhaça, além de aumentar a sua turbidez, também intensifica o cheiro repulsivo característico, tornando os ambientes insuportáveis (LORA; VENTURINI, 2012).

Os mostos fermentáveis são formados por quaisquer líquidos capazes de sofrerem fermentação, tanto que, no caso do etanol proveniente da cana-de-açúcar eles podem ser originários de três fontes distintas de matérias-primas: o caldo de cana puro, o melaço, ou a mistura dos dois (LORA; VENTURINI, 2012).

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos da vinhaça.

Parâmetro	Unidade	Valores mínimos	Valores médios	Valores máximos	Desvio padrão
pH	-	3,50	4,15	4,90	0,32
DBO	mg/L	6680,00	16949,76	7533,00	9953,12
DQO	mg/L	9200,00	28450,00	97400,00	13943,41
Sólidos totais	mg/L	10780,00	22386,90	38680,00	8792,95
Sólidos suspensos totais	mg/L	260,00	3966,84	9500,00	1940,54
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1509,00	18420,06	33680,00	6488,60
Cálcio	mg/L	71,00	515,25	1096,00	213,71
Cloreto	mg/L	480,00	1218,915	2300,00	417,49
Ferro	mg/L	2,00	25,17	200,00	36,35
Fósforo total	mg/L	18,00	60,41	188,00	36,95
Magnésio	mg/L	97,00	225,64	456,00	71,40
Manganês	mg/L	1,00	4,82	12,00	2,37
Nitrogênio amoniacal	mg/L	1,00	10,94	65,00	10,93
Nitrogênio total	mg/L	90,00	356,63	885,00	177,81
Potássio total	mg/L	814,00	2034,89	3852,00	804,31
Sódio	mg/L	8,00	51,55	220,00	41,11
Sulfato	mg/L	790,00	1537,66	2800,00	514,28
Sulfito	mg/L	5,00	35,90	153,00	32,56
Etanol - CG perdido	% v/v	0,01	0,09	1,19	0,18
Glicerol	% v/v	0,26	0,59	2,50	0,31

Fonte: Souza (2018).

Caracterizada como efluente de destilarias, a vinhaça possui alto poder poluente e valor fertilizante. Seu poder poluente é considerado cem vezes maior que o do esgoto doméstico, isso se dá por sua riqueza de matéria orgânica, baixo pH, variando entre 3,7 e 4,5, e a utilização de ácido sulfúrico nas dornas de fermentação a torna extremamente corrosiva, além dos elevados índices de DQO e DBO. É extraída no processo de destilação a uma temperatura que varia de 100 a 110°C, sendo gravemente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora de águas doces (SILVA et al., 2007).

Estudos vêm sendo realizados acerca da disposição da vinhaça no solo, com foco no pH do solo, nas propriedades físicas e químicas e nos impactos no plantio da cana-de-açúcar, porém poucos avaliam o verdadeiro potencial poluidor do vinhaça no solo e nos lençóis freáticos, uma vez que, com alto teor de matéria orgânica e nutrientes, em especial o potássio, a maioria das destilarias do país utilizam a vinhaça para irrigar e fertilizar as lavouras de cana-de-açúcar (LYRA et al., 2003).

O uso de melão na produção de etanol é favorável, pois seu preço é sempre inferior ao preço do açúcar. Apesar disso, as disponibilidades de melão são determinadas conforme a produção de açúcar e podem ser consideradas limitadas pelas necessidades de produção de etanol (LORA; VENTURINI, 2012).

Pode-se estimar que 60% da vinhaça produzida pelas usinas é proveniente de caldo de cana, enquanto 40% sejam resultantes da fermentação de mostos mistos. A maioria das usinas não utilizam o melão como mosto fermentativo, pois ele dificulta a execução da fermentação em razão ao baixo teor de açúcar residual, sendo assim, o rendimento

final da fermentação se torna menor, comparado aos outros tipos de mostos (LORA; VENTURINI, 2012).

A caracterização da vinhaça se dá pelo tipo de levedura, da água utilizada para a diluição, da limpeza das máquinas, da forma com que é feita a destilação e, sobretudo, da matéria-prima empregada no processo de fermentação. Essas características podem ser advindas do processo de produção do melão ou no caldo para se obter o mosto (COSTA, 2014).

A vinhaça consome uma grande parcela do oxigênio disponível nos cursos de água, a fim de oxidar completamente e transformar a matéria orgânica em compostos estáveis. Em comparação com outros efluentes industriais a vinhaça é o resíduo que apresenta maior DBO, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferença de DBO de alguns efluentes.

Tipo de Efluente	DBO (mg/L)
Vinhaça	16.000
Curtume	4.000
Fábrica de manteiga	1.400
Indústria têxtil	1.200
Fábrica de carne em conserva	900
Cervejaria	600
Fábrica de papel e celulose	500
Esgotos sanitários	300

Fonte: Lora e Venturini (2012).

A vinhaça não é livre de contaminantes, por isso não deve ser disposta no solo sem um tratamento químico prévio. Entretanto, sua composição apresenta macronutrientes, entre eles o potássio se apresenta em maior concentração e micronutrientes, como magnésio e ferro. Dessa forma, embora a vinhaça seja um agente que pode ocasionar grave poluição nos corpos de água, ocasionando a destruição da fauna e da flora fluvial, também é caracterizada como um subproduto com ótimas características fertilizantes que não deve ser usado excessivamente (LORA; VENTURINI, 2012).

Entre os resíduos produzidos por usinas de destilação de etanol, a vinhaça tem maior carga de poluição. É considerada um dos principais problemas ambientais lançados no meio aquático, pois tem alto DBO, tem um efeito redutor muito alto e requer uma alta taxa de oxigênio para se estabilizar. Resiste obstinadamente aos métodos habituais de tratamento de resíduos com características ácidas e corrosivas, dificultando o armazenamento e transporte sem tratamento prévio (GURGEL et al., 2012).

2.3.3 Métodos de tratamento

Segundo Lora e Venturini (2012) existem diferentes métodos para o tratamento e aproveitamento industrial da vinhaça, são eles:

- processo incineração por meio da pulverização da vinhaça nos gases de combustão;
- processo de destilação destrutiva, ou destilação pirogenosa contínua sob pressão para recuperação de metanol, acetona e outras substâncias;
- tratamento químico, combinando centrifugação com precipitação química e tratamento com depuração biológica;
- processos biológicos de depuração, ou fermentação anaeróbia;
- processos de decantação e irrigação.

Dos métodos de tratamento e disposição listados, a fertirrigação foi o método mais pesquisado, contribuindo para sua disseminação por todas as usinas do Brasil. Porém, devido à crise do petróleo em 1970, o Brasil implantou o PROALCOOL, que tinha como principal objetivo estabelecer o mercado interno como etanol combustível, substituindo gradativamente a gasolina. Assim, muitas usinas foram implantadas, e as que produziam somente açúcar foram ampliadas, passando a produzir também etanol (LORA; VENTURINI, 2012).

Como consequência disso, a vinhaça voltou a se tornar pauta de intensa discussão, visto que com a expansão do parque industrial os volumes produzidos de vinhaça eram muito grandes e, dessa forma, o solo poderia sofrer com a saturação (LORA; VENTURINI, 2012).

Para o devido aproveitamento e disposição da vinhaça foram estudadas algumas alternativas, além da já tradicional fertirrigação que sempre foi praticada pelas usinas. Essas novas propostas de disposição da vinhaça foram as seguintes:

- concentração da vinhaça por meio da evaporação ou secagem, para uso na alimentação animal;
- fermentação aeróbia, através de leveduras, bactérias e fungos, tendo em vista à produção de proteínas unicelulares;
- fermentação anaeróbia, utilizando bactérias metanogênicas, para produzir biogás.

Após isso, a vinhaça se tornou assunto de profundas pesquisas e diversos estudos foram conduzidos com o objetivo de se encontrar alternativas de aproveitamento antes da

sua disposição. Em um dos estudos avaliou-se misturas de solos arenosos e argilosos com vinhaça concentrada para fabricação de tijolos. Os resultados apontaram que a vinhaça concentrada é um agente fortificante para ambos os solos e poderia ser utilizada em escala comercial (LORA; VENTURINI, 2012).

Com estudos envolvendo rotas tecnológicas para tratamento e disposição da vinhaça, foram configuradas as principais características dos cenários que representam cada possibilidade de disposição. Para isso, os seguintes cenários foram analisados.

- Cenário 1: fertirrigação com vinhaça *in natura*
- Cenário 2: concentração evaporativa
- Cenário 3: biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade
- Cenário 4: incineração com geração de eletricidade
- Cenário 5: biodigestão com concentração e uso veicular

Cenário 1: Fertirrigação com vinhaça *in natura*

A fertirrigação é um processo de irrigação com adubação, onde se utiliza a própria água na distribuição do fertilizante nas lavouras. Na fertirrigação com vinhaça, este resíduo pode substituir parte da adubação mineral servindo como fertilizante. De acordo com o relevo, o espaço e a localização das lavouras existem métodos diferentes para se realizar a fertirrigação (SILVA, 2009).

A forma mais comum é o armazenamento da vinhaça em lagoas a céu aberto, onde por meio de canais, dutos, caminhões-tanque e rodotrem é transportada aos canaviais. Essas lagoas servem como um reservatório que permitem diminuir a diferença entre a quantidade de produção e distribuição, para que essa vinhaça não seja aplicada em excesso no solo (SILVA, 2009).

Nesse cenário é preciso analisar o armazenamento da vinhaça que é feito de forma temporária em lagoas a céu aberto unido ao transporte e distribuição através de canais e caminhões, para ser utilizada no canavial diretamente ou por aspersão. Na Figura 7, tem-se o diagrama esquemático do processo de fertirrigação que abrange os valores de volume de vinhaça distribuídos através de canais e caminhões (POVEDA, 2014).

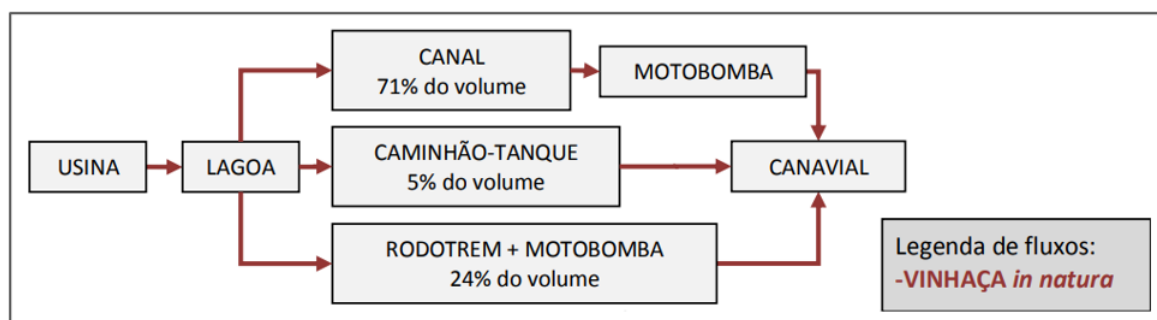


Figura 7 – Diagrama de fluxos do cenário 1.
Fonte: Poveda (2014).

Nesse caso é considerada a utilização de um modelo simplificado constituído por uma única lagoa de armazenamento, do volume total de vinhaça 71% é captada do canal por uma motobomba sendo aplicada no canavial por aspersão. Já o volume transportado pelos caminhões são de 29% do volume produzido, onde 5% é aplicado com caminhão-tanque diretamente sobre o canavial e 24% é transportado por um rodotrem e aplicado por aspersão com a motobomba.

Cenário 2: Concentração evaporativa

O volume de vinhaça que é transportado em caminhão durante o cenário 1 passa anteriormente por um processo de concentração como demonstrado na Figura 8. A vinhaça *in natura* possui 4% de sólidos e é concentrada até alcançar 20% com auxílio de um evaporador de múltiplo efeito, para em seguida ser transportada e aplicada com caminhões-tanque sobre o canavial. O volume de vinhaça transportada no canal não é concentrado (POVEDA, 2014).

Para o processo de concentração de vinhaça é preciso o fornecimento de eletricidade e de energia térmica, em forma de vapor. Os insumos são fornecidos pelo sistema de cogeração da usina, mas considera-se que a eletricidade consumida pelo sistema de concentração deixaria de ser exportada para o Sistema Interligado Nacional (SIN), onde é feita a produção e transmissão da energia elétrica, sendo contabilizada como energia recebida desta rede.

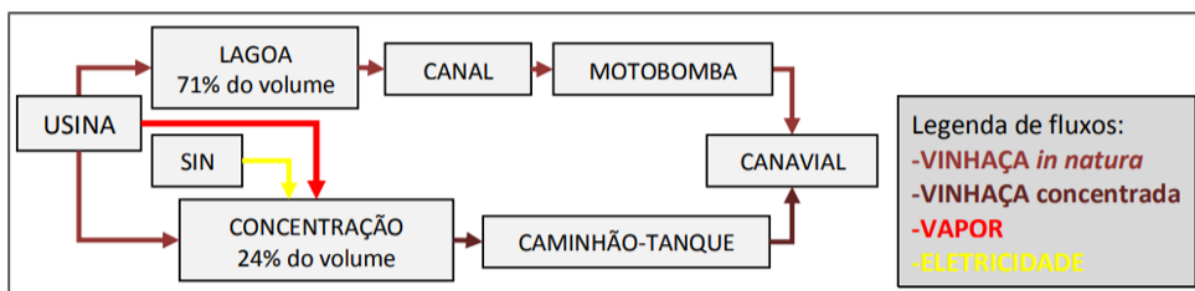


Figura 8 – Diagrama de fluxos do cenário 2.

Fonte: Poveda (2014).

Cenário 3: Biodigestão anaeróbia com geração de eletricidade

De acordo com Poveda (2014) no cenário 3 pretende-se fazer o tratamento da vinhaça com o auxílio de um biodigestor anaeróbio para produção e captura de biogás visando a geração de eletricidade. O efluente do biodigestor é usado como fertilizante na lavoura, com sua distribuição feita da mesma forma que no cenário da fertirrigação, dado que a biodigestão não reduz o volume do efluente conforme Figura 9.

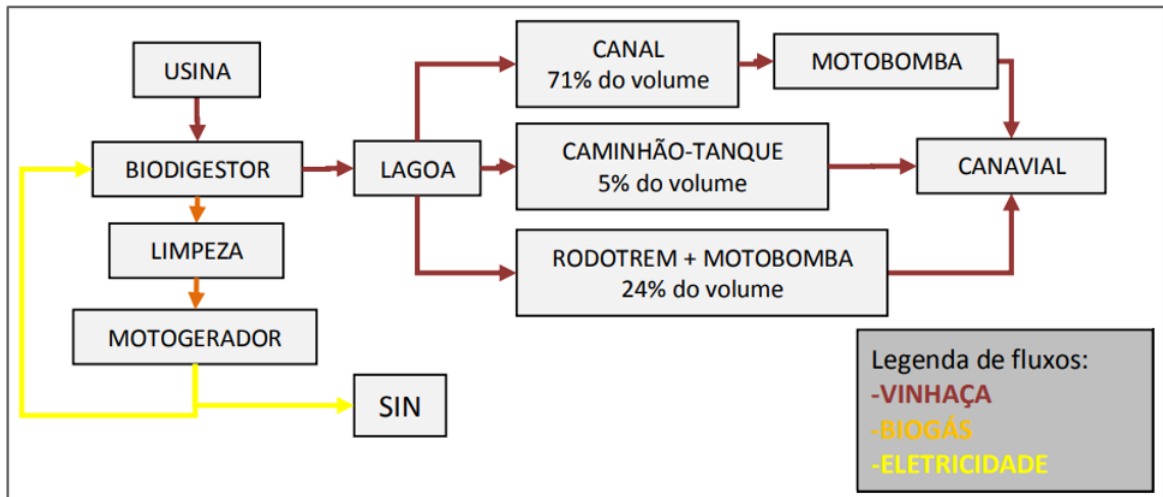


Figura 9 – Diagrama de fluxos do cenário 3.

Fonte: Poveda (2014).

Desse modo, o biogás obtido passa por tratamento para reduzir a umidade e o H_2S , para ser utilizado como combustível em motogeradores termelétricos de combustão interna. Parte da energia elétrica que foi gerada é consumida nas cargas internas do biodigestor e o restante é exportado ao SIN.

Cenário 4: Incineração com geração de eletricidade

Neste cenário a vinhaça é concentrada por meio da evaporação de múltiplo efeito até atingir 65% de sólidos solúveis, concentração em que a vinhaça ganha Poder Calorífico Inferior (PCI) suficiente para ser incinerada na caldeira. Para a combustão ser considerada completa e estável é preciso utilizar um combustível auxiliar de suporte, assumindo neste caso a utilização de gás natural (POVEDA, 2014).

Durante a queima da vinhaça e do gás natural é liberado um calor que será utilizado para gerar vapor e eletricidade conforme está representado no diagrama da Figura 10. O sistema de concentração possui um consumo térmico que é parcialmente suprido com o vapor gerado no sistema de cogeração com vinhaça, e é completado com vapor do processo resultante da usina. A eletricidade produzida abastece as cargas internas do sistema e o restante é exportado para o SIN (POVEDA, 2014).

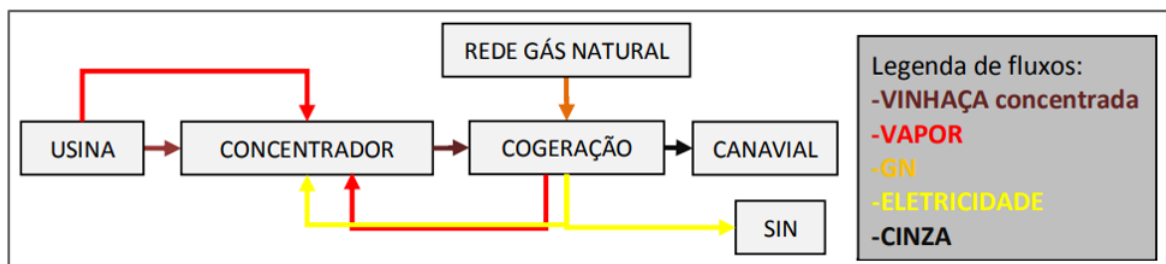


Figura 10 – Diagrama de fluxos do cenário 4.

Fonte: Poveda (2014).

Diante disso, o volume de vinhaça é completamente eliminado, evitando o sistema de transporte e distribuição do mesmo. Dessa forma, o único resíduo gerado neste processo seriam as cinzas potássicas, que podem ser utilizadas como fertilizante na lavoura.

Cenário 5: Biodigestão com concentração e uso veicular

Segundo Poveda (2014) o cenário 5 sugere a combinação dos cenários 2 e 3, com a execução da biodigestão para em seguida fazer a concentração do efluente tratado até alcançar 20% de sólidos solúveis, fazendo a distribuição da vinhaça biodigerida e concentrada para o canavial através de caminhões-tanque de acordo com a Figura 11. Além disso, é feita uma substituição parcial do diesel que é consumido nas operações de campo com o biometano produzido a partir da vinhaça.

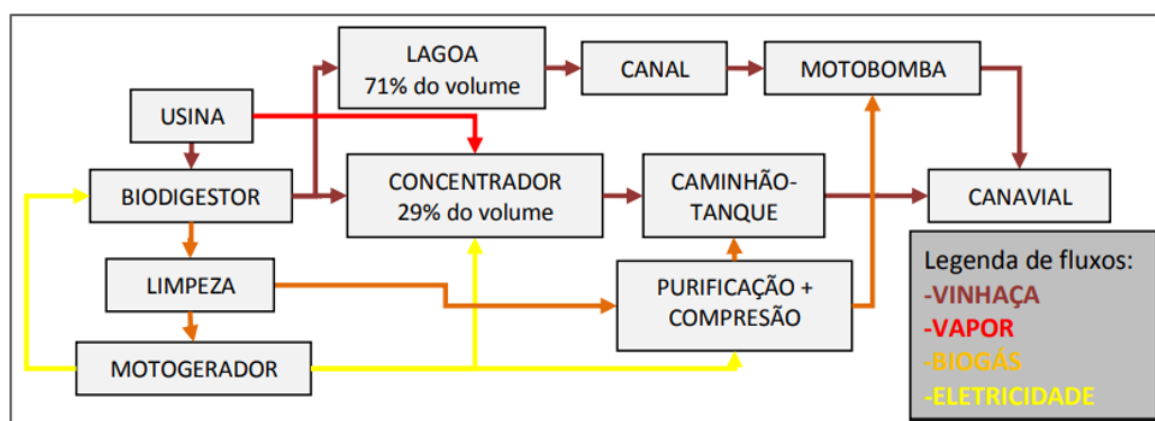


Figura 11 – Diagrama de fluxos do cenário 5.

Fonte: Poveda (2014).

A partir da descrição destes cenários, é possível definir os elementos que fazem parte de cada processo. Estas alternativas representam as tecnologias mais desenvolvidas que permitem o aproveitamento energético do processamento e uso final da vinhaça.

2.3.4 Utilização da vinhaça no Brasil

O Brasil gerou aproximadamente 280 bilhões de litros de vinhaça, em 2014, onde 97% desse volume foi usado como fertilizante e irrigação nas lavouras de cana-de-açúcar. Porém, essa prática causa impactos ambientais e desperdiça potenciais usos do produto, tais como, a geração de energia. Desse modo, a conversão da vinhaça em biogás através de biodigestores pode mudar esse cenário (SILVEIRA, 2015).

Com o tratamento apropriado, o biogás pode ser utilizado para movimentar as turbinas do gerador para gerar eletricidade. Além disso, a vinhaça biodigerida contém menos matéria orgânica contribuindo para produção de biogás e redução do impacto ambiental do uso do resíduo como fertilizante na cultura da cana-de-açúcar (SILVEIRA, 2015).

O biogás com menor concentração de gás carbônico produzido no biorreator pode ser utilizado para co gerar energia na caldeira da usina, liberando o bagaço, que pode ser usado para combustão, geração de energia e para a produção de etanol de segunda geração. O gás natural também pode ser utilizado para substituir parte do diesel dos motores de caminhões e tratores, tornando o processo produtivo da cana-de-açúcar mais sustentável (SILVEIRA, 2015).

Em sua forma líquida a vinhaça biodigerida possui baixo teor de matéria orgânica podendo ser utilizada como fertilizante, porém deve ser feita de forma que preserve praticamente todos os nutrientes originais do resíduo. Também pode ser concentrada e utilizada na formulação de fertilizante organomineral para o plantio de cana-de-açúcar, conforme as necessidades da planta (SILVEIRA, 2015). Nesse caso, a água retirada do processo de concentração pode ser devolvida à usina para diversos fins necessários.

Uma biorrefinaria que possui metade da sua produção de etanol e metade de açúcar, com uma capacidade de moer 4 milhões de toneladas de cana anualmente, é possível produzir cerca de 2 milhões de metros cúbicos (m^3) do resíduo por ano. Sabe-se que 1 m^3 de vinhaça contém potencial para gerar aproximadamente 14 m^3 de biogás, sendo assim, essa usina teria capacidade de fornecer até 28 milhões de m^3 desse gás por ano (SILVEIRA, 2015).

Convertendo esse valor para análise energética, seria correspondente a uma capacidade anual cerca de 65 mil MWh (Megawatts hora) de eletricidade. Isso representa a energia gerada com a produção de biogás de uma usina que a partir da vinhaça seria capaz de suprir a demanda de eletricidade de uma cidade de cerca de 260 mil habitantes. Pode-se dizer então que se toda vinhaça do Brasil fosse transformada em biogás, o potencial de geração de energia elétrica no país seria equivalente a 7,5% da capacidade da hidrelétrica de Itaipu (SILVEIRA, 2015).

2.4 Biogás

2.4.1 Definição

O biogás é um subproduto gasoso derivado da digestão anaeróbia (decomposição com ausência de oxigênio) de substratos, composto em sua maioria por metano e dióxido de carbono e em menores quantidades por demais componentes, tais como gás sulfídrico, amônia e umidade (Tabela 3) (BRASIL, 2020).

O metano é o componente gasoso mais atrativo dentre os que compõe o biogás, em razão do seu aproveitamento para a geração de energia que pode ser usado para substituir às fontes convencionais (petróleo, carvão e gás mineral) em outros tipos de energia como a elétrica, a térmica e como biocombustíveis (BRASIL, 2020).

Tabela 3 – Composição do Biogás

Composto	Fórmula Química	Porcentagem (%)
Metano	CH_4	50 - 75
Dióxido de Carbono	CO_2	25 - 40
Hidrogênio	H_2	1 - 3
Nitrogênio	N_2	0,5 - 2,5
Oxigênio	O_2	0,1 - 1
Ácido Sulfídrico	H_2S	0,1 - 0,5
Amônia	NH_3	0,1 - 0,5
Monóxido de Carbono	CO	0 - 0,1

Fonte: Lopes (2020).

A digestão anaeróbia é uma tecnologia de tratamento utilizada para diversos tipos de substratos orgânicos. A maior parte destes substratos são resíduos resultantes de processos produtivos, que podem ser os seguintes:

- produção animal: dejetos, rejeitos, carcaças, entre outros;
- resíduos industriais: descartes, bagaços, efluentes, entre outros;
- resíduos agrícolas: cascas, grãos, folhagens, entre outros;
- resíduos orgânicos oriundos de atividade humana: esgoto, resíduos domésticos orgânicos, de manutenção de parques, etc.

Para produção de biogás por meio de materiais orgânicos é preciso que haja grupos de microrganismos que operem em conjunto com alguns fatores que são: temperatura, pH e tipo de substrato. Se for constituído apenas por metano, conhecido também como biogás purificado, este pode ser utilizado na geração de energia elétrica e como combustível automotivo (KARLSSON, 2014).

O processo de digestão anaeróbia visa o tratamento de resíduos e efluentes orgânicos por meio de bactérias. Esse processo vem sendo utilizado de maneira crescente, visto que, através do aproveitamento do biogás e seus nutrientes é possível obter energia elétrica, além de reduzir a poluição ambiental (LOPES, 2020).

2.4.2 Potencial de produção de biogás no Brasil

Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABIOGAS, 2021), o Brasil possui o maior potencial energético mundial: cerca de 44 bilhões Nm^3/ano divididos entre resíduos do setor sucroenergético (47,8%), produção agrícola (14,9%), proteína animal (32,2%) e saneamento (5%). Essa quantidade potencial é utilizada para abastecer aproximadamente 40% da demanda por energia elétrica ou até mesmo suprir 70% do consumo de diesel do

país. Na Figura 12, estão apresentadas a origem e a aplicação do biogás no território brasileiro.

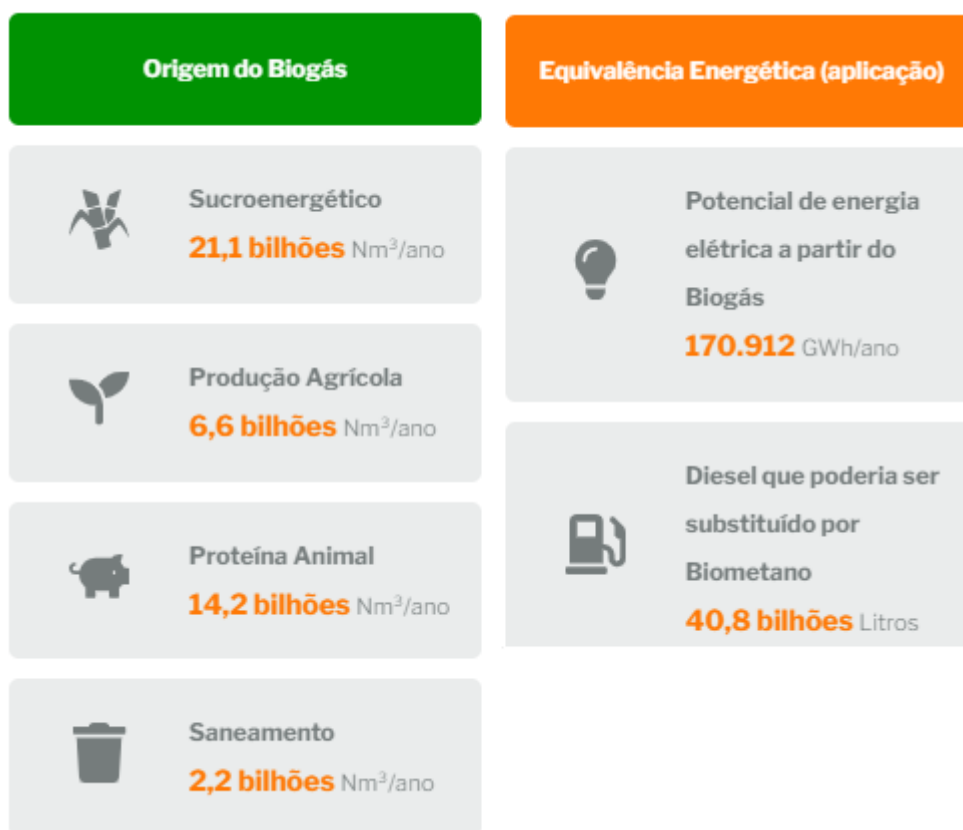


Figura 12 – Potencial brasileiro de biogás.
Fonte: ABIOGAS (2021).

Em 2020 foi observado um aumento na quantidade de plantas em operação com fins energéticos no país. Essa fonte de energia ainda segue em desenvolvimento, mas é clara a expansão dessa fonte de energia em âmbito nacional. A compra de biometano e contratação de energia elétrica derivada de autogeradores vem sendo incentivadas por meio de políticas públicas, entrando em operação com projetos expressivos nesse ramo (CIBIOGAS, 2020).

Comparando o potencial de produção anual de 82,58 bilhões Nm^3 com a produção atual de biogás brasileiro de 1,83 bilhão Nm^3 , é possível observar que apenas 2% do valor total é aproveitado e que existe grande oportunidade de expansão em mais de 97% do potencial ainda não utilizado (CIBIOGAS, 2020), de acordo com a Figura 13, representada abaixo.

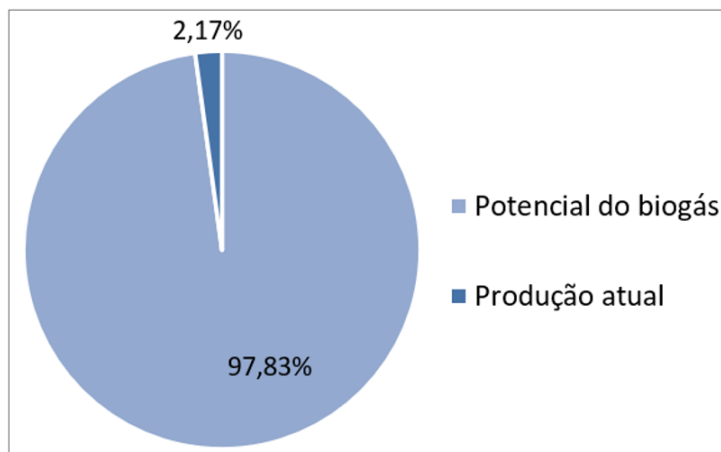


Figura 13 – Potencial nacional de biogás bruto.
Fonte: Adaptado de CIBIOGAS (2020).

É evidente que ainda pode haver exploração da parte ainda não utilizada do potencial de produção visto anteriormente. Dessa forma, por ser de fonte renovável, o biogás vem sendo cada vez mais reconhecido no setor energético. Por ser intermitente e por contribuir de forma positiva para a mudança estrutural da matriz energética brasileira o investimento nessa fonte de energia vem ocorrendo gradativamente.

Portanto, sabendo que a vinhaça proveniente da produção do etanol faz parte do setor sucroenergético, pode-se dizer então, que ela pode ser reutilizada de forma eficaz para a geração de energia elétrica e de biometano através do biogás, como já acontece em algumas regiões. Na tabela 4 tem-se o potencial desse setor pelas regiões do Brasil.

Tabela 4 – Dados regionais de biogás no Brasil.

Região	Potencial de Biogás (Nm^3/ano)
Sudeste	13,4 bilhões
Centro-Oeste	4,7 bilhões
Nordeste	1,5 bilhão
Sul	1,1 bilhão
Norte	214 milhões

Fonte: Adaptado de ABIOGAS (2021).

2.4.3 Obtenção do biogás: biodigestão anaeróbia

Para se transformar em biogás a degradação da matéria orgânica presente nos resíduos passa por um processo biológico complexo devido aos microrganismos que operam em sinergia dentro dos reatores e atuam com funções distintas durante cada etapa desse processo. Cada espécie de microrganismo necessita de condições específicas, tais como temperatura, pH, tempo, quantidade de matéria orgânica e presença de nutrientes (BRASIL, 2020).

Sendo assim, as reações que acontecem durante a digestão anaeróbia são divididas em etapas presentes na Figura 14.

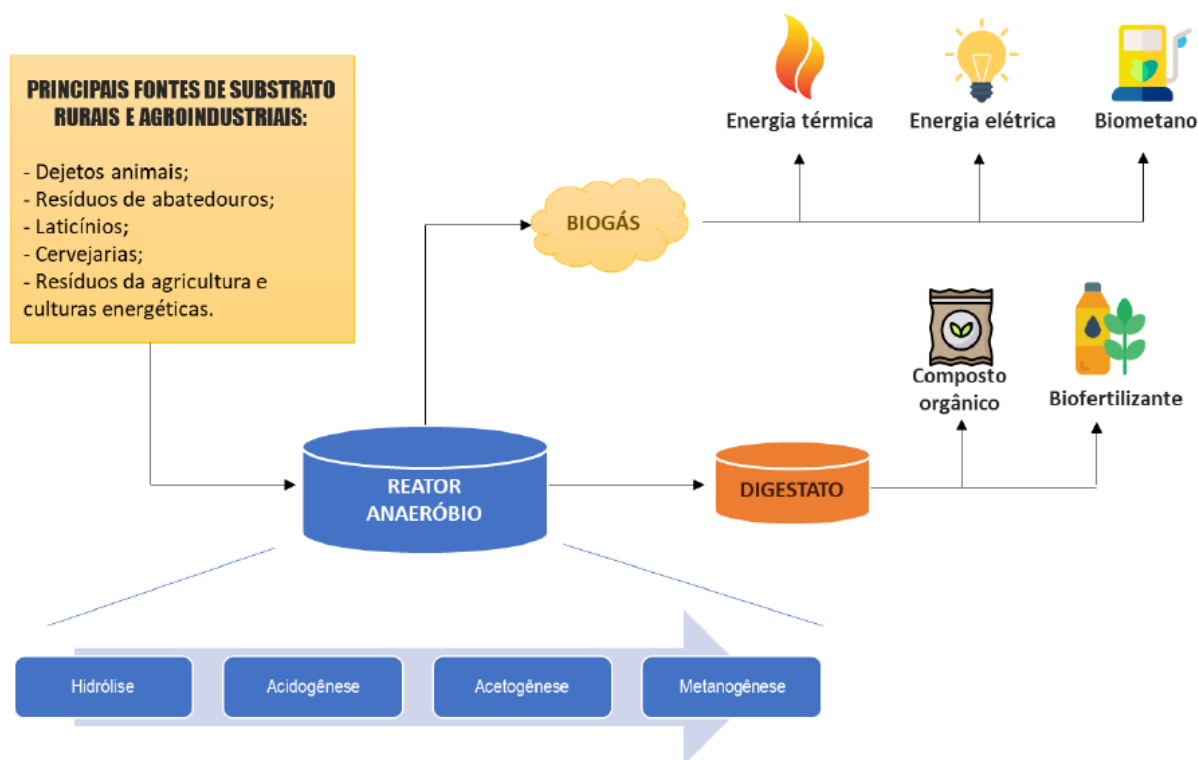


Figura 14 – Processo de degradação da matéria orgânica para a produção de biogás.
Fonte: Brasil (2020).

Durante a biodigestão anaeróbia também é gerado um subproduto líquido, conhecido como digestato. Este abrange uma série de nutrientes presentes nos resíduos de minerais que de acordo com suas condições (concentração dos nutrientes, ausência de organismos patogênicos e temperatura) são aproveitados como biofertilizante na agricultura (BRASIL, 2020).

A conversão da matéria orgânica em gases se dá por meio de materiais suscetíveis de decomposição pela ação de diferentes tipos de microrganismos. A biodigestão ocorre em quatro etapas, são elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CREMONEZ et al., 2013). Na Figura 15 tem-se a representação do processo de biodigestão anaeróbia.

Hidrólise

Etapa em que o material orgânico é dividido em pequenas moléculas para os microrganismos se alimentarem delas, absorvendo a energia nelas contidas. As bactérias presentes no biodigestor também separam enzimas que quebram as moléculas de proteína transformando-as em aminoácidos, hidratos de carbono em açúcares e álcoois em ácidos graxos. A velocidade do processo vai depender do material e da sua estrutura (VILAR, 2019).

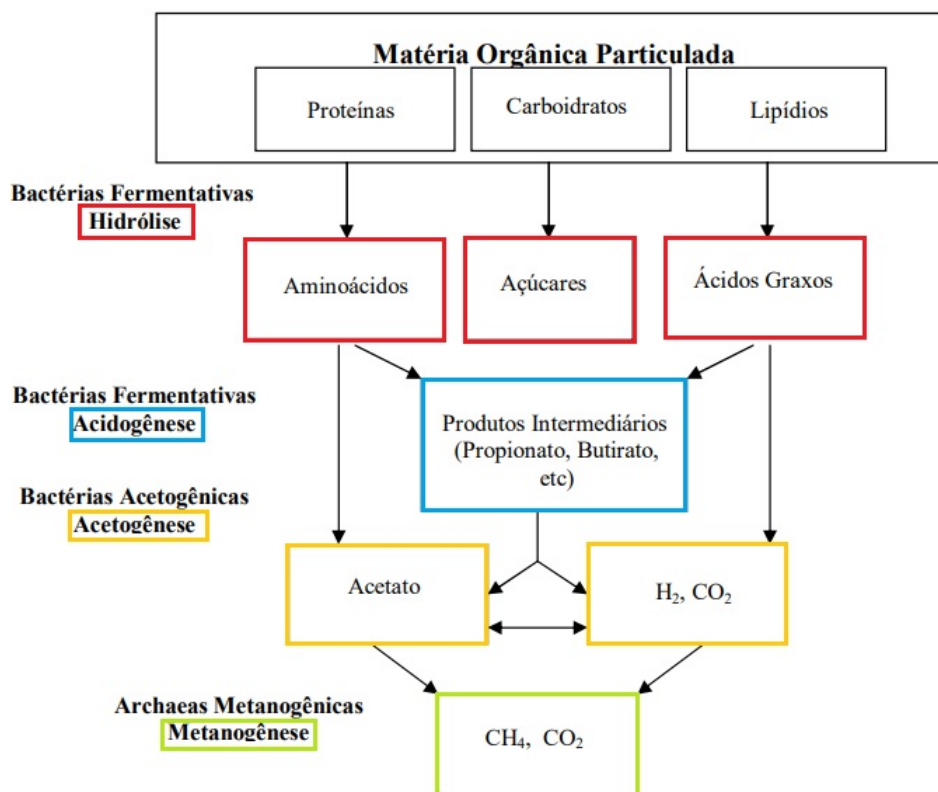


Figura 15 – Etapas do processo da digestão anaeróbia.
Fonte: Viana (2019).

Acidogênese

Também conhecida como fermentação, nessa etapa se formam os ácidos que através das reações químicas se dividem em ácidos orgânicos, álcoois, dentre outros compostos. Os microrganismos disponíveis e os fatores ambientais determinam os produtos que serão formados (VILAR, 2019).

Acetogênese

Através da oxidação anaeróbia, as moléculas que foram quebradas nas etapas anteriores se rompem em moléculas ainda menores fazendo com que seja necessária uma boa interação entre os microrganismos que são responsáveis pela produção do metano. As bactérias dessa etapa não resistem ao hidrogênio em excesso, então é preciso que as bactérias metanogênicas consumam esse hidrogênio (VILAR, 2019).

Metanogênese

Essa etapa é onde se forma o metano, o composto mais importante gerado nesse processo pelo seu alto potencial energético. Para o metano ser formado é preciso ácido acético, dióxido de carbono e subprodutos das etapas anteriores. Nesse momento também são produzidos CO_2 e H_2O (VILAR, 2019).

As bactérias presentes nessa fase não são resistentes às alterações de pH e substâncias tóxicas, pois esses fatores podem inibir o crescimento dessas bactérias, por isso é importante fazer com que esse processo se adapte às bactérias metanogênicas, uma vez que o gás metano é o composto de maior interesse ao final desse processo.

2.4.4 Fatores que interferem na biodigestão

Diferentes parâmetros da digestão anaeróbia interferem no metabolismo dos microrganismos participantes do processo da degradação da matéria orgânica. Eles afetam a taxa de digestão e produção de biogás, tanto nas condições de operação do sistema de tratamento, como nos aspectos relacionados às variações ambientais. No entanto, fazer o controle desses parâmetros otimiza a atividade bacteriana, podendo aumentar a produção de biogás (SILVA, 2015).

Os fatores que mais influenciam no desempenho do processo da degradação anaeróbia de biomassa são: temperatura, pH, alcalinidade, necessidades nutricionais, presença de inibidores tóxicos (amônia, sulfato e sulfitos), sobrecarga hidráulica, relação carbono/nitrogênio (C/N), tempo de retenção hidráulica (TRH), tempo de retenção de sólidos (TRS) e atividade metanogênica (SILVA, 2015). A seguir tem-se a descrição desses fatores.

Temperatura

De acordo com SILVA (2015) a temperatura é um fator ambiental muito importante na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, visto que ela interfere nos processos biológicos, de forma que altera a velocidade do metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos, especialmente de lipídeos. Quando a temperatura alcança valores menores que $20^{\circ}C$, a solubilização de gorduras do material particulado e de polímeros orgânicos ocorre lentamente, sendo capaz de se constituírem durante a etapa limitante do processo.

Para Chernicharo (2007), caso ocorra desses constituintes não serem solubilizados, provavelmente serão arrastados do reator ou ficarão acumulados na superfície ou no sistema de separação sólido/gás/líquido, afetando a passagem do biogás. Em processos biológicos existem faixas ideais de temperatura associadas ao crescimento de microrganismos (Figura 16), onde as bactérias são divididas em três grupos:

- faixa psicrófila: entre 0 e $20^{\circ}C$;
- faixa mesófila: entre 20 e $45^{\circ}C$;
- faixa termófila: entre 45 e $70^{\circ}C$, e acima.

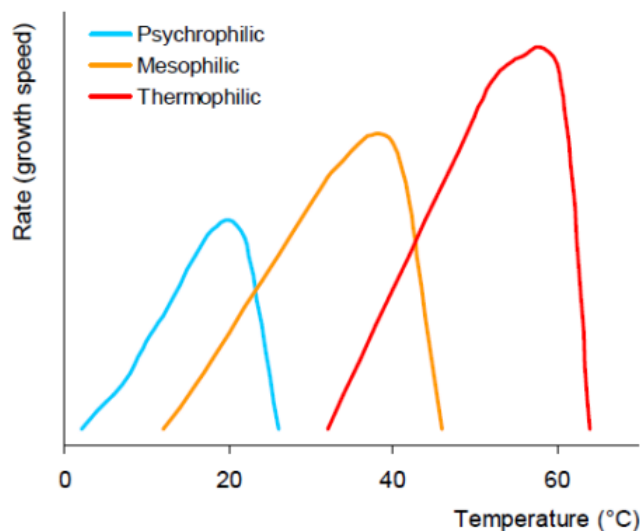


Figura 16 – Faixa ótima de temperatura dos microrganismos na digestão anaeróbia.
Fonte: Vilela (2015).

Por meio da atividade microbiana a formação de metano (CH_4) pode ocorrer em uma faixa de temperatura ampla, indo de 0 a $97^\circ C$, entretanto, em dois níveis considerados ótimos têm sido associados à digestão anaeróbia, um na faixa mesófila de 30 a $35^\circ C$ e o outro na faixa termófila entre 50 e $55^\circ C$ (CHERNICHARO, 2007).

Segundo Bohrz et al. (2010), durante as etapas de hidrólise e acidogênese o efeito da temperatura não é significativo, em razão da ampla diversidade de bactérias atuantes, já no decorrer das etapas de acetogênese e metanogênese, onde os grupos de bactérias especializadas atuam, a variação brusca de temperatura gera um efeito negativo na fisiologia destes microrganismos, afetando o seu desempenho.

pH e Alcalinidade

O aumento da concentração de ácidos voláteis no material em digestão causa a queda no pH do meio, no momento em que a alcalinidade do sistema não é suficientemente alta. A redução do pH a valores menores que 6,5 possibilita o desenvolvimento de bactérias acidogênicas, onde o pH ideal se encontra de 5,5 a 6,0. Com isso, o desenvolvimento das bactérias metanogênicas é prejudicado, onde o pH ideal é entre 6,5 e 8,2 (LOPES, 2020).

Para o ajuste de pH, é utilizado o óxido de cálcio (CaO) conhecido também como cal (por ser a fonte mais acessível de alcalinidade), até que se atinja um pH entre 6,7 a 6,8, contudo, por ser muito insolúvel, pode ocasionar sérios problemas operacionais. Por sua vez, o bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) ao contrário da cal, possui fácil manuseio, é solúvel em água e não eleva muito o pH, a desvantagem é seu custo elevado (CHERNICHARO, 2007).

Necessidades nutricionais

Os microrganismos necessitam de uma fonte de carbono para o seu crescimento (CO_2 e carbono orgânico) (LOPES, 2020). Durante os processos biológicos de tratamento de águas residuais, a presença de concentrações adequadas de macro e micronutrientes é imprescindível para atender as necessidades metabólicas dos microrganismos metanogênicos (SILVA, 2015).

Existem elementos fundamentais para o crescimento bacteriano no processo de digestão anaeróbia, a inclusão do fósforo (P) nesse processo, durante a relação de carbono/fósforo (C/P), é suficiente para o crescimento de microrganismos. Os principais micronutrientes exigidos pelas bactérias que formam o metano a partir do acetato são: ferro (Fe), monóxido de carbono (Co), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) (SILVA, 2015).

Capacidade de assimilação a cargas tóxicas

De acordo com Chernicharo (2007), a sensibilidade na digestão anaeróbia a cargas tóxicas depende, consideravelmente, da idade do lodo ou tempo de retenção celular (TRC). Quanto maior o TRC, maior será a capacidade do reator de assimilar cargas tóxicas.

As águas residuais contém compostos tóxicos como sulfeto e oxigênio dissolvido. O oxigênio pode ser inserido no biodigestor com o afluyente durante a recarga. O contato do oxigênio com o lodo metanogênico impede sua atividade (CHERNICHARO, 2007).

Caso a aeração não seja intensa, o oxigênio inserido poderá ser removido pelas bactérias acidogênicas, não havendo ação tóxica. O sulfeto pode ser desenvolvido no reator pelas bactérias redutoras de sulfato, no decorrer do processo de sulfetogênese, gerando sulfeto de hidrogênio (H_2S) e CO_2 (SILVA, 2015).

Tempo de retenção hidráulica

Segundo Lopes (2020) o tempo de retenção hidráulica é aquele em que a matéria-prima permanecerá no biodigestor para ser digerida. É identificado como a relação entre o volume do digestor e o volume de carga diária, conforme a equação a seguir:

$$THR = \frac{VB}{VC}$$

Onde,

THR = Tempo de Retenção Hidráulica (dias)

VB = Volume do Biodigestor (m^3)

VC = Volume da Carga Diária (dejetos + água) (m^3/dia)

Impermeabilidade do ar

Impermeabilização é o ato de isolar e proteger os materiais de uma edificação da passagem indesejável de líquidos ou vapores. Dessa forma, as condições da estrutura são mantidas. Além de ser uma técnica de aplicação de produtos específicos com o objetivo de proteger as paredes do biodigestor, incluindo medidas contra a ação de águas que podem vir da chuva, de lavagem, ou de outras fontes (GOIÁS, 2022).

O planejamento adequado serve para reduzir o custo e aumentar a eficiência do biodigestor (Figura 17). Além do mais, a falta ou uso incorreto da impermeabilização compromete a durabilidade da estrutura. Uma impermeabilização mal executada pode causar prejuízos financeiros e danos à saúde. A água infiltrada nas superfícies e nas estruturas afeta sua alvenaria. O ambiente fica insalubre devido à umidade, fungos e mofo e vai diminuindo a vida útil do biodigestor (GOIÁS, 2022).

Nenhuma das atividades biológicas dos microorganismos (como seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo), demanda oxigênio. Em sua presença eles se tornam muito sensíveis, produzindo dióxido de carbono; e em sua ausência, produzem metano. Se o biodigestor não estiver devidamente vedado a produção de biogás é impedida (LOPES, 2020).



Figura 17 – Impermeabilização de biodigestor.
Fonte: Total (2022).

2.4.5 Biodigestores/reatores para produção de biogás

O biodigestor é um equipamento usado para acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica. Uma espécie de tanque de reator à prova de ar onde acontece a formação do biogás, é um equipamento de extrema importância nas plantas de produção de biogás. No mundo há vários modelos de biodigestor, variando o tipo de material, o formato, tamanho (de acordo com a instalação) e local de instalação (superfície ou subsolo) (SEADI, 2008).

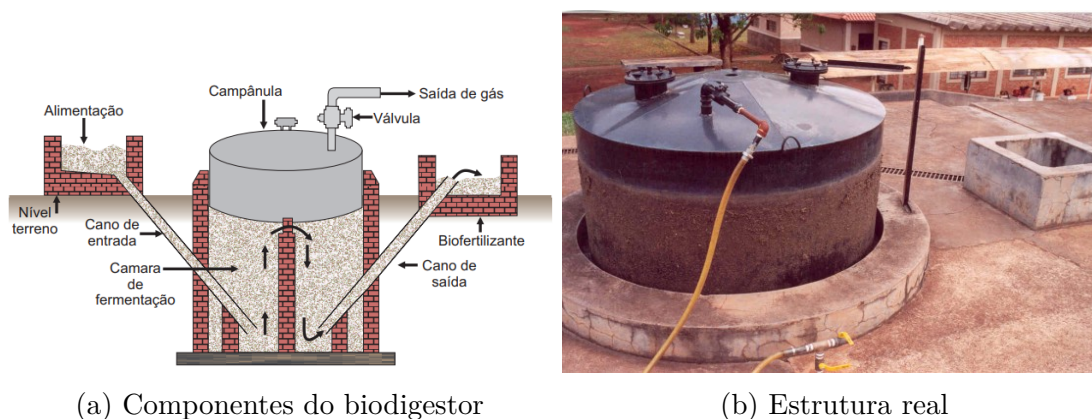
A digestão anaeróbia ocorre de duas maneiras: seca e úmida. Na digestão seca o conteúdo de matéria seca do substrato deve estar acima de 15%, normalmente está entre 20 e 40%. A matéria-prima seca são resíduos sólidos urbanos, grama, culturas energéticas, entre outros. Na digestão úmida o teor de matéria seca do substrato deve ser menor que 15%. São exemplos de matéria úmida o lodo de esgoto e o estrume (SEADI, 2008).

De acordo com SILVA (2015), existem diferentes tipos e modelos de biodigestores, denominados também de reatores, com variadas formas e tamanhos, de acordo com a disponibilidade de espaço e da finalidade a que se pretende utilizá-los. É possível serem de alvenaria, de concreto ou PVC. Dentre os modelos de biodigestores existentes, os mais comuns são os indianos, chineses, canadenses e o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) e de manta de lodo.

Modelo Indiano

O biodigestor indiano possui uma campânula flutuante que funciona como gasômetro, podendo estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou flutuando em um “selo d’água”. Possui também uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, onde o material circula pelo interior da câmara de fermentação de forma homogênea. O biogás não consumido faz o gasômetro se deslocar na vertical, produzindo aumento em seu volume, mantendo em seu interior a pressão constante (SILVA, 2015).

Os componentes principais de um biodigestor indiano estão representados na Figura 18, composto por uma caixa de carga, responsável por abastecer o biodigestor com o substrato afluente; um tubo de carga normalmente de PVC, por onde o substrato é levado até o fermentador; um tubo de descarga que conduz o biofertilizante mais leve para a caixa de descarga; o gasômetro feito geralmente de PVC, para o armazenamento do biogás; e o coletor de gás (SILVA, 2015).



(a) Componentes do biodigestor

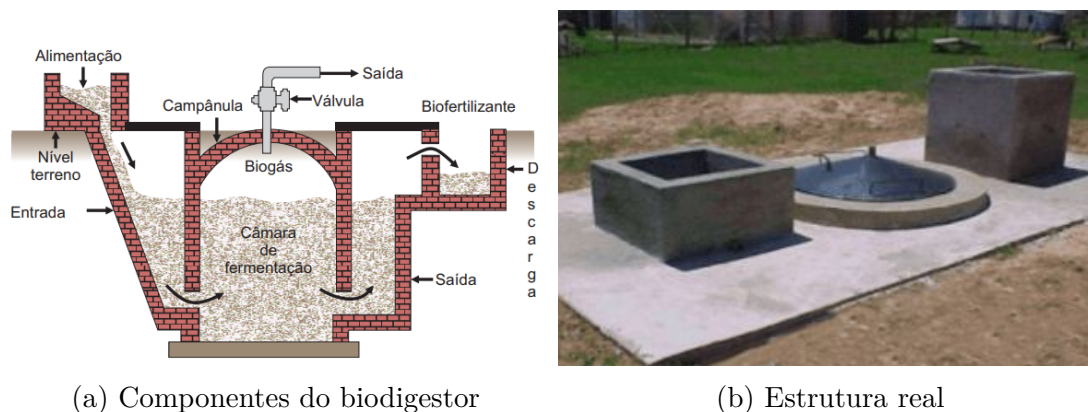
(b) Estrutura real

Figura 18 – Biodigestor modelo indiano.

Fonte: Cassini et al. (2014).

Modelo Chinês

O biodigestor chinês (Figura 19) é produzido em forma de uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria (tijolos), com teto fixo e impermeável, feito para o armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona a base de pressão hidráulica, ou seja, o aumento de pressão em seu interior resulta no acúmulo do biogás na câmara de fermentação, conduzindo a biomassa (substrato sólido) diretamente para a caixa de saída (CASSINI et al., 2014).



(a) Componentes do biodigestor

(b) Estrutura real

Figura 19 – Biodigestor modelo chinês.

Fonte: Cassini et al. (2014).

Constituído em sua maioria por alvenaria, dispensando o uso de gasômetro com chapa de aço, promovendo uma redução de custos, todavia podem acontecer problemas com vazamento de biogás caso a estrutura não esteja bem vedada e impermeabilizada. Neste modelo de biodigestor uma parte do biogás produzido na caixa de saída é lançada na atmosfera, diminuindo a pressão interna do gás. Com isso, o biodigestor chinês não é indicado para instalações de grande porte (CASSINI et al., 2014).

Modelo canadense

O biodigestor canadense possui uma estrutura simples do tipo horizontal de fluxo tubular com câmara de biodigestão cavada no solo (Figura 20) e com gasômetro do tipo inflável feito geralmente de plástico.

Este modelo é composto pelos seguintes componentes: caixa de carga, responsável por abastecer o biodigestor com o substrato; tubo de carga, que faz o transporte do substrato afluyente até o fermentador; tubo de descarga, que leva o material biodigerido para a caixa de descarga, na saída do biodigestor; campânula (lona de PVC) fixada nas laterais com lâmina d'água para evitar vazamento; e saída de gás do gasômetro (SILVA, 2015).

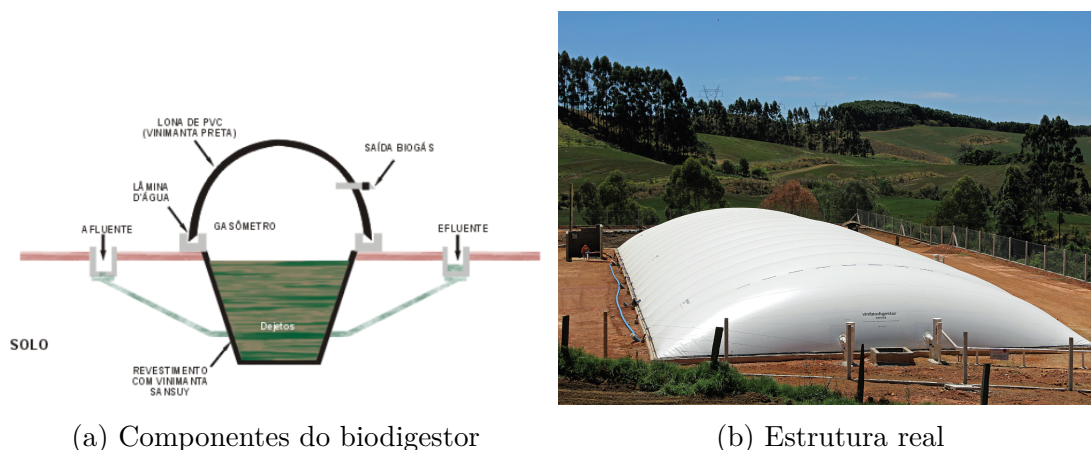


Figura 20 – Biodigestor modelo canadense.
 Fonte: Frigo et al. (2015).

Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e de Manta de Lodo (RAFA)

Também denominado como UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), são tidos como reatores de alto desempenho e são apropriados para a biodigestão anaeróbia da vinhaça, pois contém uma elevada concentração de microrganismos em seu interior (Figura 21). Nestes reatores de fase líquida a biomassa fica suspensa formando uma camada estável de biomassa, permitindo a passagem da fase líquida removendo os nutrientes orgânicos constituindo a fase gasosa (CASSINI et al., 2014).

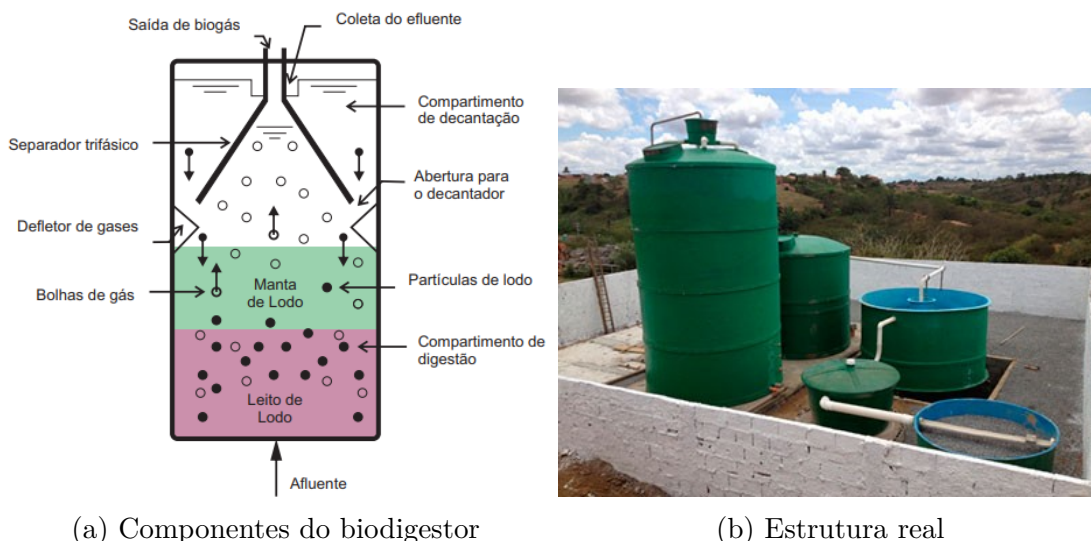


Figura 21 – Reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB ou RAFA).
 Fonte: Cassini et al. (2014).

Segundo SILVA (2015), este reator possui baixo tempo de detenção hidráulica (TDH), funcionando como entrada do afluente pela parte inferior do reator e conforme circula no sentido ascendente passa através do manto de lodo, que acelera o processo

da biodegradação. Com isso, o material biodegradado passa pelo deflector de gases para fazer a separação dos materiais sólido, líquido e gasoso, assim, o efluente (biofertilizante) é retirado na parte lateral, e o biogás na parte superior do reator.

Para Pereira et al. (2020a), os reatores UASB possuem a maior taxa de sucesso para a digestão anaeróbia de vinhaça fresca, pois apresentam baixo teor de sólidos, esse modelo de reator possibilita o bombeamento e a reciclagem e, conseqüentemente, uma redução no tempo de residência hidráulica, diferentemente do que acontece em outros digestores.

Existem outros tipos de reatores anaeróbios, que variam desde fossas simples e tanques sépticos até reatores mais sofisticados que utilizam membranas especialmente projetadas. Dentre os diversos tipos de reatores e tratamentos anaeróbios, o reator UASB é o mais utilizado. (CASSINI et al., 2014).

2.4.6 Vantagens da biodigestão

Para SILVA (2015), além da produção de biogás, as vantagens da digestão anaeróbia em biodigestores para cogeração de energia e calor e da produção de biofertilizante, podem ser resumidas em:

- baixo consumo de energia;
- pequena produção de lodo (efluente);
- grande eficiência na redução da carga orgânica;
- baixo potencial poluidor.

O biodigestor tem como função limpar os resíduos que não são aproveitáveis. É denominado como um poço de petróleo, uma fábrica de fertilizantes e uma usina de saneamento, sendo apenas um equipamento. É trabalhado com todo tipo de material que possa se decompor biologicamente sob as ações bacterianas anaeróbicas (BONTURI et al., 2012), auxiliando no saneamento ambiental.

O desenvolvimento da biodigestão da vinhaça armazena as propriedades fertilizantes do efluente e diminui o potencial de poluição da terra e mananciais pelo aumento do pH e pela redução de aproximadamente 90% da DQO no decorrer do tratamento (PEREIRA, 2009).

A biodigestão anaeróbia possui diversas vantagens essencialmente na área ambiental, visto que, o uso da biodigestão pode também desenvolver resultados com o mercado de créditos de carbono. Os projetos que contém biodigestores se encaixam no programa *American Carbon Registry* (ACR) do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL); por

isso, o MDL tem como propósito diminuir a taxa de emissões de GEE (PENTEADO et al., 2017).

De acordo com Penteado et al. (2017), os parâmetros de medição usados para definir a taxa de estabilização da matéria orgânica podem abranger outros métodos como a razão celulose-lignina (C/L), o pH, sólidos voláteis (bastante usado pela rapidez e pelo menor custo) e o potencial bioquímico de metano (*Biochemical Methane Potential* - BMP).

O BMP é uma medida da biodegradação encontrada em uma amostra, estima a produção de metano começando pela biodegradabilidade do resíduo. O teste de BMP tem como resposta a determinação do metano a partir da massa do substrato. Além de decretar o potencial de metano, com baixo custo, reprodutibilidade e capacidade de facilitar na instalação são algumas vantagens da realização do ensaio BMP. (PENTEADO et al., 2017).

Produzir energia de fonte renovável e criar fonte de rendimento regular e segura é criar valor a partir de resíduos orgânicos. Por meio de um processo de biometanização (onde se utilizam bactérias naturais para fazer a decomposição da matéria orgânica) são gerados produtos de grande valia, como o biogás e o composto. O composto possui potencial de ser comercializado como biofertilizante para solos (ENERGY, 2021).

A valorização do biogás produzido em sistemas de digestão anaeróbia pode ser obtida com a geração de energia térmica e elétrica, podendo ser usadas para comercialização ou auto-consumo, mediante a produção de biometano que serve como biocombustível para veículos ou para a injeção em redes de gás (ENERGY, 2021).

Para Energy (2021), as soluções da digestão anaeróbia podem proporcionar diversas vantagens, dentre elas estão:

- solução ambientalmente segura para tratamento de resíduos;
- produtos para utilização como fertilizante;
- produção de energia renovável;
- potencial redução nos custos de tratamento de resíduos orgânicos;
- redução de custos de investimento;
- redução da pegada de carbono pelas empresas.

A digestão anaeróbia, também chamada de biometanização é considerada uma evolução no tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, pois quando se trata a matéria orgânica um composto é produzido, este pode ser utilizado como condicionador de solo e possibilita a recuperação da energia com o aproveitamento do metano produzido no biogás (VILELA, 2015).

Segundo Contrera (2017), as vantagens do processo de biometanização (biodigestão anaeróbia) são as seguintes:

- a) promoção da reciclagem da matéria orgânica e de nutrientes;
- b) redução da produção de lodo/sólidos;
- c) redução da demanda de área;
- d) produção de lodo (resíduo) bem estabilizado;
- e) redução no consumo de nutrientes;
- f) redução no consumo de energia (sem necessidade de aeração);
- g) produção de metano, possibilidade em ser fonte de energia;
- h) suporte de elevadas cargas orgânicas;
- i) preservação do lodo anaeróbio (biomassa) por longos períodos de tempo, sem precisar alimentar o reator;
- j) redução do risco de poluição ambiental, podendo ser realizado em sistema fechado (contanto que executado de maneira correta);
- k) apresentação de tecnologia com alto potencial para países de clima quente ou tropical.

Para Nogueira et al. (2015), a vinhaça demonstra o maior potencial de geração de biogás por digestão anaeróbica, com benefícios econômicos e ambientais. A matéria orgânica é transformada em metano e dióxido de carbono durante a digestão anaeróbia, utilizando diferentes grupos de bactérias e arqueobactérias.

Esta combinação de gás forma o biogás, um combustível que possui diversas aplicações, abrangendo gás de cozinha, combustível para veículos, geração de energia elétrica e até mesmo para aquecimento residencial. O biometano é obtido a partir da purificação do biogás, para poder ser introduzido em uma rede de gás ou colocado para o processo de cogeração. Assim, com seu uso existe a possibilidade de diminuir a necessidade da importação de gás natural. (NOGUEIRA et al., 2015).

3 Metodologia

A metodologia usada foi a análise do levantamento de referências bibliográficas, sendo portanto, um procedimento teórico, cujo objetivo foi recolher informações e conhecimentos prévios acerca da utilização da vinhaça para geração de energia elétrica no Brasil. Para a realização da busca por referências foi estipulado um intervalo de tempo de dez anos (2012 à 2022), como um período atual que traz artigos de relevância para os resultados esperados.

A pesquisa sucedeu na busca de livros e artigos científicos e tecnológicos de estudos realizados para produção de biogás a partir da vinhaça. As ferramentas de busca utilizadas foram: o Portal de Periódicos Capes (CAPES, 2021), ScienceDirect (SCIENCEDIRECT, 2021), Scielo (SCIELO, 2021) e Cadernos de Prospecção (PROSPECÇÃO, 2022) com a aplicação de palavras-chaves relacionadas ao tema, juntamente com operadores booleanos como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Palavras-chave utilizadas nas ferramentas de busca.

Palavra-chave	Operador Booleano	Palavra-chave
Biogás	and	Vinhaça
Biodigestores	and	Vinhaça
Biogás	and	Etanol
Biogás	or	Biodigestores
Biodigestão	or	Biogás
Economia	and	Vinhaça

Fonte: Autoral, 2021.

A partir dessa pesquisa foi realizada uma triagem dos artigos de maior interesse, que foram direcionados diretamente ao tema deste trabalho para cumprimento do escopo determinado, com o objetivo final de certificar a eficácia do uso do biogás oriundo da vinhaça no país.

4 Resultados e Discussão

Conforme metodologia utilizada, foram encontrados dezenove (19) estudos de casos com temas relacionados a viabilidade energética e econômica do biogás da vinhaça no Brasil. Nas Tabelas 6 e 7, estão presentes os resultados que foram obtidos de acordo com as palavras-chave e seus respectivos portais de buscas mencionados anteriormente.

A partir da leitura dos artigos, foram selecionados três (3) estudos principais que possuem características semelhantes aos objetivos a serem alcançados neste trabalho, visando a comparação dos dados alcançados em cada um. Logo, os artigos utilizados foram os seguintes:

- Análise de viabilidade econômica financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade no Brasil;
- Avaliação tecnoeconômica da produção de bioenergia a partir da digestão anaeróbica de subprodutos de usinas de etanol flex;
- Energia do biogás da vinhaça e análise econômica no estado de São Paulo, Brasil.

Tabela 6 – Pesquisa realizada na revista eletrônica Cadernos de Prospecção e na biblioteca eletrônica Scielo.

Palavras-chave	Resultados
Biogás <i>and</i> vinhaça	Elaboração de Roadmap Tecnológico Para a Produção de Biogás a Partir da Vinhaça
Biodigestores <i>and</i> vinhaça	Nenhum resultado encontrado
Biogás <i>and</i> etanol	Nenhum resultado encontrado
Biogás <i>or</i> biodigestores	Estudo Prospectivo sobre a Utilização de Biomassa na Produção de Biogás para Geração de Energia Descentralizada
Biodigestão <i>or</i> biogás	Monitoramento Tecnológico dos Processos de Aproveitamento do Biogás Como Fonte de Energia Renovável

Fonte: Autoral, 2021.

Tabela 7 – Pesquisa realizada no Portal de Periódico Capes e ScienceDirect.

Palavras-chave	Resultados
Biogás <i>and</i> vinhaça	<p>Projeto de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) Para o Tratamento de Vinhaça.</p> <p>Análise de viabilidade econômica financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade no Brasil.</p> <p>Produção de biometano a partir de vinhaça em reatores anaeróbios de manta de lodo de fluxo ascendente inoculados com lodo granular.</p> <p>Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso.</p> <p>Explorando possibilidades de inserção energética do biogás da vinhaça na matriz energética do Estado do Paraná, Brasil.</p> <p>Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil.</p> <p>Redução das emissões de gases de efeito estufa da vinhaça por meio da digestão anaeróbica.</p> <p>Avaliação econômica da substituição do bagaço da cana por vinhaça, como fonte de energia em uma usina hidrelétrica no estado do Paraná.</p> <p>Avaliação tecnoeconômica da produção de bioenergia a partir da digestão anaeróbica de subprodutos de usinas de etanol flex.</p> <p>Custos de oportunidade para vendas de bioeletricidade nas indústrias sucroenergéticas brasileiras</p>
Biodigestores <i>and</i> vinhaça	Mesmos resultados encontrados anteriormente.
Biogás <i>and</i> etanol	<p>Produção e uso de biogás a partir da vinhaça: Implicações para o balanço energético e emissões de GEE do etanol de cana-de-açúcar no contexto brasileiro.</p> <p>Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono - estudo de caso.</p>
Biogás <i>or</i> biodigestores	Mesmo resultados encontrados anteriormente.
Economia <i>and</i> Vinhaça	<p>Energia do biogás da vinhaça e análise econômica no estado de São Paulo.</p> <p>Diversificando as estratégias tecnológicas para recuperação de bioenergia a partir da digestão anaeróbica bifásica da vinhaça de cana-de-açúcar: uma abordagem tecnoeconômica e ambiental integrada.</p> <p>Avaliação técnico-econômica de diferentes rotas de aproveitamento de biogás a partir da digestão anaeróbica da vinhaça na indústria brasileira de bioetanol.</p> <p>Digestão anaeróbia da vinhaça das biorrefinarias de cana-de-açúcar no Brasil sob as perspectivas energética, ambiental e econômica: Lucro ou despesa?</p>

Fonte: Autoral, 2021.

4.1 Estudo de Casos do Uso da Vinhaça para Geração de Eletricidade

Por se tratar de um estudo teórico, foram analisados *cases* importantes para os resultados dessa pesquisa. Diante disso, foi possível concluir de forma assertiva a análise da viabilidade de se obter biogás a partir da vinhaça presente na produção de etanol e sua posterior utilização na geração de energia elétrica no Brasil.

4.1.1 Case I: Viabilidade Econômica Financeira

O estudo em questão (ARAUJO et al., 2021) é uma pesquisa quantitativa, através de uma simulação com fundamentos em dados secundários que foram obtidos de órgãos como: ANP, na qual os dados se baseiam no tamanho das plantas produtoras de etanol; ANEEL, com dados referentes aos preços praticados em leilões de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada (ACR); e Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), cujo os dados são de preços utilizados no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Essa pesquisa teve como objetivo a identificação do preço mínimo de MWh em mercados livres e regulados do setor elétrico no Brasil e a análise da logística de vinhaça de acordo com a capacidade de produção de usinas autônomas em $100m^3$, $1.000m^3$ e $3.000m^3$ etanol/dia para cenários com e sem isenção de impostos, incentivando também a discussão sobre a eletricidade e seu local de geração, ou seja, a geração distribuída aos estados que produzem etanol (ARAUJO et al., 2021).

4.1.1.1 Resultados

Devido à grande capacidade produtora da vinhaça na fabricação de etanol, se faz necessário uma discussão acadêmica sobre suas opções de utilização, tendo em vista a busca de soluções para o problema ambiental gerado (ARAUJO et al., 2021).

Contudo, o potencial energético da vinhaça está sendo desaproveitado, na medida em que a carga elevada orgânica não está sendo utilizada para produções de biogás, para substituição do diesel ou geração de eletricidade com a biodigestão anaeróbica (ARAUJO et al., 2021). Além disso, o procedimento de biodigestão anaeróbica não remove da vinhaça a propriedade fertilizante que possui, o que é de interesse de modo ambiental, econômico, energético, e social no setor sucroenergético.

A utilização de vinhaça para geração de eletricidade, se mostra um importante complemento da energia hidráulica, descentralização de produção e também na segurança no Sistema Elétrico Nacional (FILHO, 2009). Tanto no aspecto ambiental, como na mitigação da emissão de GEE que inclui a Política Nacional de Mudanças Climáticas, Pensamento de Ciclo de Vida (PCV) e normalização dos níveis de DQO e do pH de acordo com (MORAES et al., 2014).

Contudo, pode-se constatar sobre o grau de importância do preço do MWh e da quantidade de produção para viabilidade econômica de comercialização da eletricidade. As usinas sucroenergética que estão estabelecidas, contra a crise no setor, prologam ou cancelam projetos de ampliação. Sendo assim, o preço do MWh é a dimensão que colabora de forma decisiva na viabilidade econômica para criação de eletricidade a partir de vinhaça (ARAUJO et al., 2021).

Os resultados alcançados estão conforme (CASTRO; DANTAS, 2018) demonstram em seus estudos, a necessidade de uma reconquista por parte da ANEEL dos leilões próprios para biomassa, cujo o preço do MWh seria de acordo com o custo das termoelétricas de biomassa, fazendo com que a vinhaça pudesse ser contemplada como um recurso para usos elétricos. Nos modelos atuais de leilões no ACR as vantagens socioambientais da biomassa não estão tendo um valor estimado, na medida em que os valores nos leilões no ACR de 2005 a 2016 estiveram em US\$ 35,87/MWh, fazendo com que usinas eólicas e pequenas centrais hidrelétricas fossem contempladas, dificultando assim para outros modelos como biomassa e solar.

O preço de viabilidade do MWh para termoelétricas de vinhaça sem isenção de impostos é de US\$ 63,77/MWh a US\$ 101,47/MWh, como mostrado na Tabela 8. Assim, mesmo com a capacidade de produção em ascensão e políticas de isenção fiscal, essas termoelétricas mostram-se inviáveis aos preços atuais praticados nos leilões de eletricidade no ACR (ARAUJO et al., 2021).

Tabela 8 – Preço de viabilidade econômica em relação a capacidade produtiva da usina.

Capacidade produtiva da usina	Cenário com isenção fiscal	Cenário sem isenção fiscal
100 m ³ de etanol/dia	US\$ 95,45/MWh	US\$101,47/MWh
1.000 m ³ de etanol/dia	US\$ 61,00/MWh	US\$ 64,85/MWh
3.000 m ³ de etanol/dia	US\$ 59,98/MWh	US\$ 63,77/MWh

Fonte: Adaptado de ARAUJO et al. (2021).

A volta de leilões particulares para biomassa no ACR, possui também um grau de importância para sustentabilidade econômica do empreendedor, com um determinado fluxo de caixa que permite que o investimento se pague a longo prazo, dando rendimento para o empreendedor e as instituições financeiras. No ACL, onde o preço do MWh é mais atrativo, apresenta maior volatilidade quanto aos períodos de contratos menores se equiparado com o ACR. Nesse caso, possui riscos de mudança de preço e contratos que possam não ser suficientes para quitação do empreendimento (CASTRO; DANTAS, 2018).

Dessa forma, não se torna um parâmetro adequado para uma análise de viabilidade, o que reforça a importância dos leilões ACR para a criação de novos empreendimentos na área de elétrica de acordo com o desenvolvimento sustentável.

4.1.1.2 Discussão

A eletricidade possui um papel fundamental no desenvolvimento dos países. Por isso, dispor de um parque elétrico que suporte o crescimento econômico, o bem-estar social, de acordo com a preservação do meio ambiente e que seja próxima do centro consumidores é de grande importância e vantagem competitiva entre os países (ARAUJO et al., 2021).

O setor sucroenergético se encontra na combinação entre a produção de eletricidade próxima dos centros consumidores e o tripé da sustentabilidade (aspectos: social, ambiental e financeiro). Este setor, além da criação de etanol e açúcar, contribui na geração de eletricidade limpa e renovável para o país. Com a crise de custo no setor elétrico, a reutilização de resíduos para a produção de eletricidade auxilia de maneira significativa, mitigando a emissão de GEE e as perdas em transmissão e distribuição.

Portanto, conforme ARAUJO et al. (2021), a produção de energia elétrica através da vinhaça pode diminuir os impactos ambientais, contribuindo também na redução das perdas de energia elétrica durante o processo de transmissão, ampliação do mercado com a venda da bioeletricidade nos leilões de energia elétrica realizados pela ANEEL. Além disso, há a possibilidade da substituição da vinhaça pela palha e pelo bagaço da cana para o aumento geração de eletricidade, com isso a produção de etanol de segunda geração é ampliada.

4.1.2 Case II: Avaliação Tecno-econômica da Produção de Bioenergia

Para este estudo de caso foi utilizada uma usina de etanol do Estado do Mato Grosso, a mesma processa 2880 toneladas por dia de cana-de-açúcar, relacionando com o *Case I* essa usina possui capacidade produtiva de mais de $1000m^3$ de etanol/dia. Os parâmetros de entrada são apresentados junto com os dados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de entrada e dados de produção da usina.

Parâmetros	Unidade	Cana de açúcar
Taxa de fluxo de matéria-prima	tonelada dia ⁻¹	2880
Período de colheita	dia	180
Produção de etanol	L dia ⁻¹	184.320
Proporção vinhaça/etanol	L _{vinhaça} L _{etanol} ⁻¹	13
Proporção vinhaça/etanol	L _{vinhaça} L _{etanol} ⁻¹	–
Vazão da vinhaça	m ³ dia ⁻¹	2396
Taxa de fluxo de vinhaça	m ³ dia ⁻¹	–

Fonte: Tena et al. (2022).

Este estudo propõe que a digestão anaeróbica da vinhaça seja implementada em uma usina de etanol, para que possa produzir biogás e a queima para a geração de energia elétrica, fazendo uma análise avaliativa tecno-econômica da produção de bioenergia.

4.1.2.1 Resultados

Produção Teórica de Biogás

Para realização do cálculo teórico da produção de biogás e metano, expresso em P_{PRB} - taxa potencial de produção de biogás (m^3 biogás/dia) e P_{PRM} - taxa potencial de produção de metano (m^3 CH_4 /dia), foram utilizadas as equações 4.1 e 4.2 (GRANATO, 2016).

$$P_{PRB} = RFR \times T_{DQO_{residuo}} \times ER_{DQO} \times RB \quad (4.1)$$

$$P_{PRM} = P_{PRB} \times f_{CH_4} \quad (4.2)$$

Onde,

RFR = taxa de fluxo de resíduos (m^3 /dia);

$T_{DQO_{residuo}}$ = total de DQO dos resíduos (kg/m^3);

ER_{DQO} = eficiência de remoção de DQO (%);

RB = rendimento de biogás (m^3 de biogás/kg de remoção de DQO); e

f_{CH_4} = fração de metano no biogás.

A produção de biogás e metano foi calculada com base na digestão anaeróbia da vinhaça (Figura 22). Para a safra de cana-de-açúcar o volume de biogás foi estimado em $6,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, resultando em uma produção de $3,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ de metano (Tabela 10).

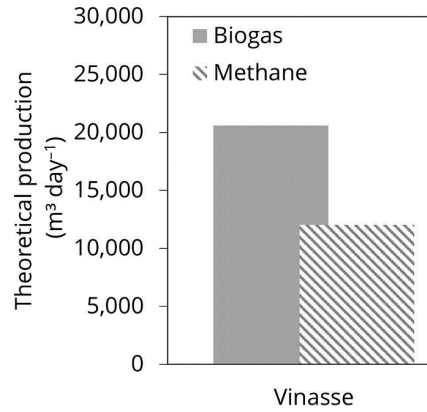


Figura 22 – Produção teórica de biogás e metano para vinhaça.
Fonte: Tena et al. (2022)

Tabela 10 – Produção teórica de biogás para vinhaça.

Parâmetros	Unidades	Vinhaça
RFR	$\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$	2396
resíduo T DQO	kgm^{-3}	33,69
ER DQO	%	60,70
Rendimento de biogás	$\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$ remoção de DQO	0,43
f_{CH_4}	%	58,40

Fonte: Tena et al. (2022).

Potencial de Geração de Energia Elétrica

O potencial de geração de eletricidade (GE), medido em MWh/tonelada, foi calculado usando a equação (4.3) conforme Campello et al. (2021):

$$GE = VB \times MPC_{\text{CH}_4} \times f_{\text{CH}_4} \times \eta_m \times \eta_g \times F_c \quad (4.3)$$

Onde,

VB = volume de biogás (m^3);

MPC_{CH_4} = menor poder calorífico do metano ($8500 \text{ Kcal}/\text{m}^3$);

f_{CH_4} = fração de metano no biogás;

η_m = eficiência do motor (45%);

η_g = eficiência do gerador (95%); e

F_c = fator de correção, devido às perdas geradas na energia final (90%).

Tabela 11 – Parâmetro técnico calculado para eletricidade gerada a partir da vinhaça.

Parâmetro	Unidade	Vinhaça
Eletricidade	MWh dia ⁻¹	45,78
	GWh ano ⁻¹	8,24

Fonte: Tena et al. (2022).

Emissões evitadas de GEE

As emissões de gases de efeito estufa (EGEE) que são evitadas indicam o potencial de diminuição das emissões GEE pela usina de produção considerando que as fontes externas de energia sejam substituídas pela energia elétrica produzida pela queima de biogás em uma cogeração (TENA et al., 2022). As emissões evitadas de gases de efeito estufa para gerar eletricidade foram estimadas de acordo com a equação 4.4.

$$EGEE_{GE} = 0,075 \times GE \times t \quad (4.4)$$

Onde,

0,075 = fator de emissão para a geração de energia elétrica brasileira (ton CO₂/MWh);

GE = potencial de geração de eletricidade (MW/tonelada); e

t = tempo de operação (7200 h/ano).

A partir do potencial de energia elétrica gerado pela queima de biogás no motor da cogeração (Tabela 11), foram estimadas as emissões de GEE evitadas anualmente (Tabela 12). Além disso, as emissões de GEE na produção e uso de etanol são estimadas em 29gCO_{2eq}/MJ (KHATIWADA et al., 2016), e as emissões de GEE evitadas com a implementação da digestão anaeróbia em uma usina de etanol para o tratamento de vinhaça podem ser uma alternativa para reduzir a pegada de carbono das usinas de etanol.

Tabela 12 – Emissões de GEE evitadas.

Parâmetro	Unidade	Vinhaça
Eletricidade GEE evitada	tonelada CO _{2eq} ano ⁻¹	618,02

Fonte: Tena et al. (2022)

Avaliação Tecno-econômica

A análise tecno econômica é utilizada de forma ampla para comparar o custo-benefício de um processo estabelecido com existentes tecnologias ou que estejam em desenvolvimento para conferir se a viabilidade econômica é alcançada (ZHANG, 2017). As condições de custo são apresentadas na Tabela 13 para avaliação.

Tabela 13 – Condições adotadas para o estudo de caso.

Parâmetros	Unidades	Valor
<i>Preços de venda</i>		
Energia elétrica	USD MWh ⁻¹	60,56
Energia térmica	USD MJ ⁻¹	0,0082
<i>Custos</i>		
Vinhaça	USD m ⁻³	0,10
Destilação	USD m ⁻³	0,15
Água	USD m ⁻³	0,35
NaOH	USD kg ⁻¹	0,53
Energia elétrica	USD MWh ⁻¹	60,56
Custo operacional de mão de obra	USD h ⁻¹ trabalhado	3
<i>Insumos econômicos</i>		
Vida útil do projeto	ano	25
Taxa de depreciação anual	%	10
Taxa de imposto anual	%	25
Taxa de atratividade	%	15
Planta de operação de tempo	dia ano ⁻¹	320
Financiamento (capital externo)	%	100
Capital externo (período de financiamento bancário)	ano	10
Taxa de juros anual	%	8,5
Taxa de câmbio média para o ano de 2020	USD BRL ⁻¹	3,94

Fonte: Tena et al. (2022).

O custo do equipamento para implantação do processo de digestão anaeróbia foi utilizado como base para o cálculo do investimento de capital fixo. Considerando todos estes custos, o investimento foi de 972.230,22 USD. O maior custo vem do digestor, que representa 35,56% do valor total. Além disso, a Tabela 14 apresenta as despesas anuais, pois esses custos são obrigatórios para a implementação do processo (TENA et al., 2022).

Tabela 14 – Discriminação dos custos utilizados.

Parâmetros	Unidades	Vinhaça
Matéria-prima	USD ano -1	43.128
Mão de obra operacional	USD ano -1	23.040,00
Água para limpeza	USD ano -1	1.058,40
Energia elétrica	USD ano -1	4.844,80
Gerenciamento de digestão	USD ano -1	24.459 0,00
Implementação	USD ano -1	97.223,00

Fonte: Tena et al. (2022).

Para a análise econômica, assume-se que um motor de cogeração converte o biogás em energia elétrica, assumindo-se a venda de 100% dessa energia. Essa venda anual está apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Valor da venda anual da eletricidade a partir da vinhaça.

Parâmetro	Unidade	Vinhaça
Eletricidade	USD ano ⁻¹	499.756,00

Fonte: Tena et al. (2022).

Análise Econômica da Produção de Bionergia

Após determinar os principais custos do processo, é necessário calcular o custo de fabricação (CF), como mostrado na equação 4.5. A análise econômica da produção de bioenergia é calculada como a soma dos principais componentes do processo (TURTON et al., 2008) e seu resultado se encontra no gráfico da Figura 23.

$$CF = (0,304 \times ICF) + (2,73 \times CMO) + [1,23 \times (CUT + CTR + CRM)] \quad (4.5)$$

Onde,

ICF = Investimento em capital fixo;

CMO = Custo de mão-de-obra operacional;

CUT = Custo das utilidades;

CTR = Custo de tratamento de resíduos;

CMP = Custo de matéria-prima.

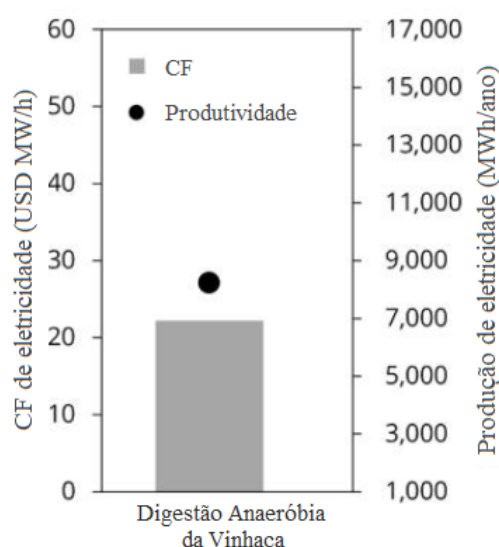


Figura 23 – Custo de fabricação e produtividade de energia elétrica.
Fonte: Tena et al. (2022).

4.1.2.2 Discussão

Mais pesquisas sobre os aspectos econômicos, ambientais e sociais são necessárias para estabelecer as rotas tecnológicas mais adequadas para o gerenciamento de subprodutos industriais para usinas de cana-de-açúcar. Políticas estatais de médio e longo prazo e mecanismos de desenvolvimento limpo que visem promover o mercado brasileiro de bioenergia e a descarbonização da matriz energética são estratégias poderosas (TENA et al., 2022).

Do ponto de vista da biomassa, a digestão anaeróbia, tecnologia mundialmente disseminada e reconhecida como barata (NIKOLAUSZ; KRETZSCHMAR, 2021), é potencialmente adequada e viável para fechar a circularidade das usinas em projetos de bioenergia. O estado de Mato Grosso tem forte vocação agroindustrial e também pode desempenhar um papel importante no setor energético brasileiro, incluindo o uso racional de energia renovável a partir de biomassa e subprodutos agroindustriais. A biomassa residual é uma fonte abundante de bioenergia e biomateriais e sua recuperação da digestão anaeróbia pode estimular o desenvolvimento de uma economia circular (GENG; SARKIS; BLEISCHWITZ, 2019).

Além disso, agrega valor aos materiais por meio de uma tecnologia conhecida, flexível e barata. Além de reduzir os custos de aquisição de fertilizantes minerais e emissões de GEE do solo, o uso de digerido para fertirrigação de culturas, maximiza a reciclagem interna de nutrientes e reduz a dependência de recursos externos não renováveis (BULLER et al., 2021).

4.1.3 Case III: Análise Econômica do Biogás no Estado de São Paulo

No Brasil, o principal produtor de cana-de-açúcar e etanol é o estado de São Paulo (SP), produzindo aproximadamente 50% da produção nacional e representando 55% de todas as áreas plantadas no país (UNICA, 2021).

Este estudo teve como objetivo apresentar o potencial de geração de energia e avaliar a viabilidade econômica para a digestão anaeróbia da vinhaça em geradores UASB para se produzir biogás e gerar energia elétrica no estado de SP. Os cálculos do potencial energético total e do potencial economicamente viável do biogás de vinhaça são dados que podem ser utilizados para tomada de decisão e planejamento energético brasileiro (PEREIRA et al., 2020b).

As equações utilizadas para os cálculos de biogás e energia são fundamentadas na metodologia apresentada por BERNAL e SANTOS (2015), que chegam ao resultado do potencial de produção de energia do biogás da vinhaça a partir do cultivo da cana-de-açúcar em SP. A quantidade de área cultivada para cada cidade foi obtida pelo projeto *Canasat* (INPE, 2014), com monitoramento via satélite. Foram analisados 645 municípios, com cálculos da quantidade produzida de cana e do volume produzido de vinhaça.

4.1.3.1 Resultados

A partir de cálculos energéticos e econômicos realizados, obteve-se o mapa energético (Figura 24), com um potencial que pode ser gerado a partir da vinhaça por cada município (PEREIRA et al., 2020b). O norte do estado apresenta maior potencial (cor vermelha), onde se pode identificar 3 municípios na classe de até 15189 MWh/ano. A

região sul possui menor geração de energia (cor amarela), com 241 municípios na classe de até 298 MWh/ano.

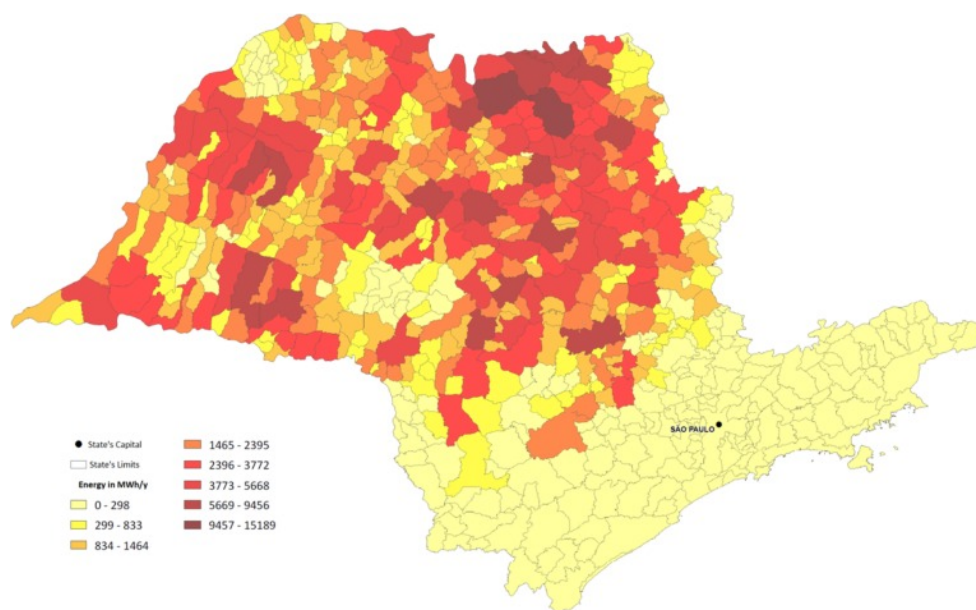


Figura 24 – Potencial de geração eletricidade da vinhaça por município do estado (SP).
 Fonte: Pereira et al. (2020b).

A Tabela 16 mostra uma análise da distribuição de energia gerada nos municípios em estudo. A maior quantidade de municípios está na faixa de 0 - 298MWh/ano, devido a áreas que não são plantadas cana-de-açúcar ou têm uma área de plantio menor.

Tabela 16 – Análise estatística da geração de energia elétrica por município de São Paulo.

Limite Inferior (MWh/ano)	Limite Superior (MWh/ano)	Número de Municípios	Frequência relativa
0	298	241	37,36%
299	833	96	14,88%
834	1464	111	17,21%
1465	2395	84	13,02%
2396	3772	56	8,68%
3773	5668	38	5,89%
5669	9456	16	2,48%
9457	15.190	3	0,47%
Total		645	100%

Fonte: Pereira et al. (2020b).

Observa-se também que 47,75% dos municípios do estado apresentam um potencial maior que 833 MWh/ano, o que confirma o potencial da vinhaça na geração distribuída, abastecendo centrais localizadas em áreas próximas de cana-de-açúcar, reduzindo as perdas com linhas de transmissão, devido a uma menor distância, e reduzindo a carga total na rede elétrica (PEREIRA et al., 2020b).

A possibilidade de viabilidade econômica em municípios com uma área de plantação de cana-de-açúcar reduzida (menor potência disponível) pode ser um ponto importante para o crescimento da geração distribuída a partir de fontes de biomassa pelo país, fazendo com que se tenha uma diversidade no mercado de geração distribuída no país, voltado principalmente para a energia solar fotovoltaica (ANEEL, 2019).

Assim que é realizada a análise energética, avalia-se a viabilidade econômica da energia gerada por município, mapeando cada VPL, conforme mostrado na Figura 25. Estes em laranja a vermelho escuro são os municípios com viabilidade econômica positiva representam cerca de 33% do total, contabilizando 211 municípios do estado de São Paulo. Ao considerar apenas os municípios plantados com cana-de-açúcar (485), o número de municípios viáveis para produção de energia elétrica aumenta para aproximadamente 44% do total.

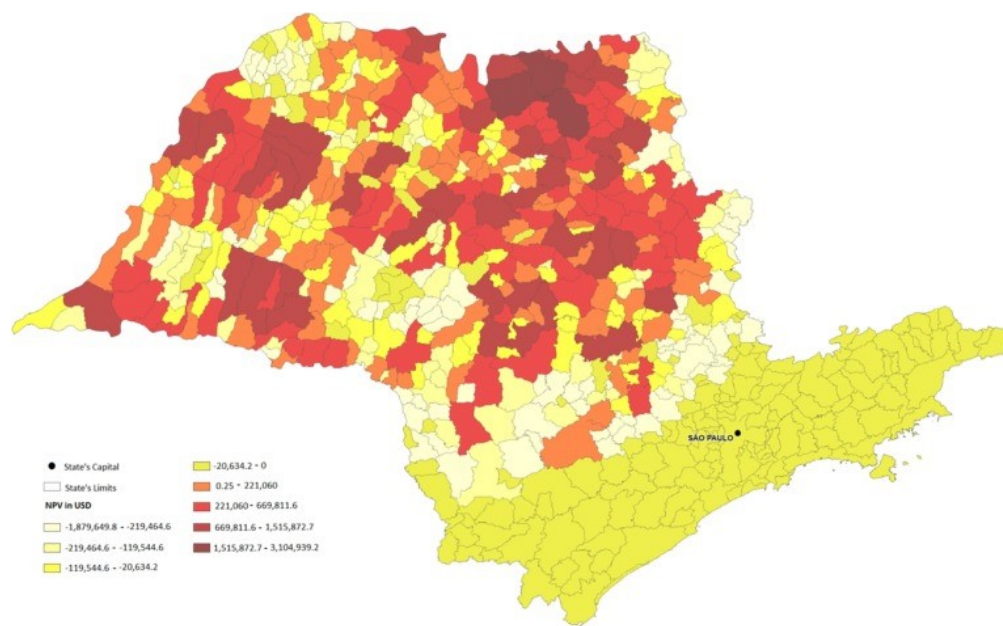


Figura 25 – Potencial econômico para geração de energia elétrica a partir da vinhaça utilizando Valor Presente Líquido, por município do estado (SP).

Fonte: Pereira et al. (2020b).

O potencial total de energia elétrica que a vinhaça atingiu foi de aproximadamente 829 GWh/ano. Considerando que apenas 33% dos municípios são economicamente viáveis, é possível adquirir aproximadamente 659 GWh/ano. Assim, a capacidade de um terço dos municípios gera 80% do potencial energético do estado. Considerando o total de energia viável (659 GWh/ano) é possível estimar o número de pessoas que recebem

energia utilizando essa energia. Levando em consideração um consumo per capita de 2.228kWh/habitante/ano (EPE, 2017), isso se torna uma soma total de 295.702 habitantes.

É notável que a população é significativa e pode incluir cidades inteiras, como a cidade de Morro Agudo com a maior área plantada de cana-de-açúcar em SP, com 29.115 habitantes. Segundo a Secretaria de Energia e Mineração (SÃO PAULO, 2018), o estado possui cerca de 145.000 GWh/ano, a partir dessa energia total disponível seria possível abastecer 0,45% de SP, favorecendo a geração de energia sustentável. Logo, os resultados obtidos são vantajosos quanto ao uso desse tipo de energia renovável.

Na escolha sobre outras alternativas de produção de energia, uma investigação específica de sustentabilidade deve ser feita com uma avaliação do ciclo de vida de todo o processo utilizado. Para Pereira et al. (2020b), as plantas de digestão anaeróbia da vinhaça agregam o meio ambiente quando comparadas à lagoa da vinhaça. Essas plantas podem contribuir em até 77% na recuperação da vinhaça e 46% da energia extraída do ambiente natural.

Por fim, o custo nivelado de energia (tarifa mínima de venda de energia que viabiliza o projeto) foi verificado para geração de energia elétrica a partir da vinhaça conforme mostra a Figura 26. No mapa, a região sul é identificada como “Municípios sem produção ou baixa produtividade de cana-de-açúcar”, pois esses municípios não a produzem, ou a área de plantio é tão pequena que inviabiliza o custo de energia por MWh. Já a região norte do estado possui o menor custo, chegando a um valor próximo a 55,8 USD/MWh.

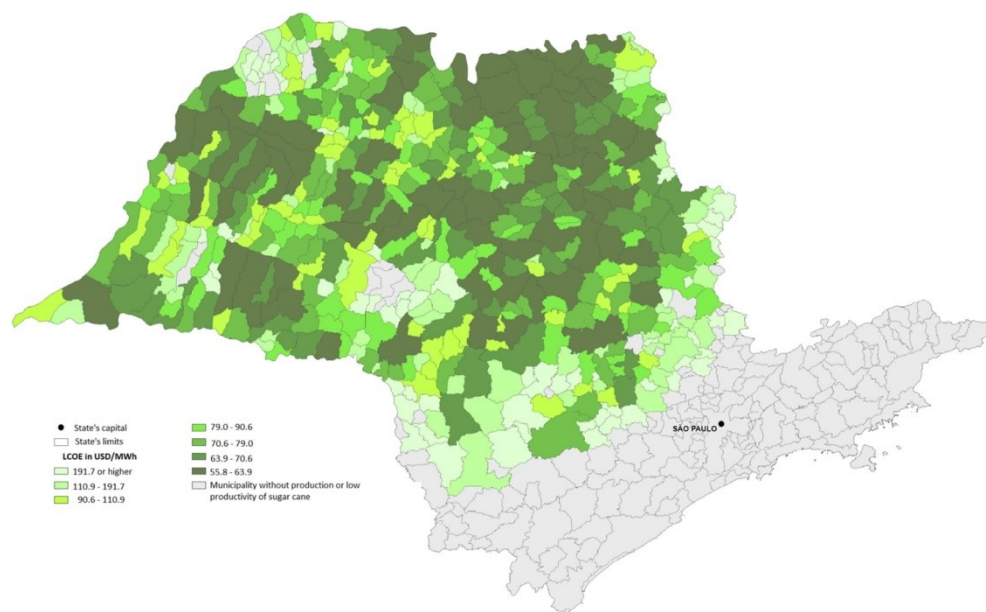


Figura 26 – Mapa do custo unitário da energia elétrica gerada a partir da vinhaça por município do estado de São Paulo.

Fonte: Pereira et al. (2020b).

A maior proporção do custo nivelado de energia se encontra em 44% dos municípios canavieiros, a segunda em 25%, e a terceira em 9%. Os demais municípios possuem custos mais elevados em razão da menor quantidade da sua plantação de cana-de-açúcar.

4.1.3.2 Discussão

Diante da avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás de vinhaça e da viabilidade econômica proveniente desta aplicação, foi possível observar que para o estado de São Paulo, o potencial total de geração foi de 829 GWh/ano, no entanto o potencial de energia viável foi de 80% da capacidade total. A quantidade de municípios considerados economicamente viáveis para a geração de eletricidade representa 33% do total estudado. Dessa forma, a parcela de energia viável poderia abastecer aproximadamente 300 mil habitantes (PEREIRA et al., 2020b). De acordo com os mapas apresentados a região norte do estado se destaca em maior potencial gerador.

Analisando os resultados, percebe-se que se a cana-de-açúcar fosse processada em sua totalidade, a maioria dos municípios possuiriam potencial de geração de energia elétrica com custo nivelado de eletricidade menor do que as outras fontes renováveis do país, fazendo com que esta fonte de energia possa competir com as demais. Além de poder agregar no crescimento da geração distribuída no estado, com a redução de gastos no processo de transmissão e perdas de energia, reduzindo também o consumo de energia da rede interligada nacional, que é composta em sua maioria por fontes de origem fóssil.

Contudo, é possível utilizar a metodologia dessa pesquisa na análise do potencial energético e econômico do biogás proveniente de outros resíduos, tanto no Brasil como em outros países. Dessa forma, é viável fazer a relação entre um tipo resíduo específico a um limite de viabilidade a partir da quantidade potencial de uma região. Segundo Pereira et al. (2020b), essa ferramenta agrega na decisão empresarial e em estudos voltados para o planejamento energético, sendo fundamental para o desenvolvimento do setor elétrico no Brasil, visto que é um país com elevada capacidade de geração de energia por usinas de biogás, e um dos maiores exportadores mundiais de produtos agrícolas.

4.2 Análise dos Cases

Analisando os *cases* explanados anteriormente é possível constatar que o uso da vinhaça na produção de biogás e sua posterior utilização na geração de energia elétrica é importante para o desenvolvimento energético do país. Além de trazer benefícios ambientais e sociais, essa fonte de energia renovável deve ser melhor aproveitada devido ao seu potencial de geração em regiões menos exploradas no Brasil.

A viabilidade econômica também é algo fundamental para a aplicação de uma tecnologia no setor elétrico, e como mostrado, a implementação do processo se torna viável financeiramente devido ao valor agregado na venda final da energia, gerando o retorno esperado. Vale ressaltar a quantidade de emissões de GEE evitadas com a aplicação da digestão anaeróbia dentro das usinas de etanol para o devido tratamento de seus resíduos.

Para uma melhor visualização do cenário vantajoso que se faz com o uso da vinhaça na geração de biogás, foi feita uma comparação dos dados obtidos de acordo com pontos em comum entre eles. Essa comparação é apresentada na Tabela 17.

Tendo em vista as vantagens do uso do biogás da vinhaça já utilizado em alguns estados brasileiros, se faz necessária a implementação de políticas que promovam o mercado de bioenergia no país. Além disso, é de extrema importância que a ANEEL reconsidere e estude formas de incentivar os leilões para biomassa, fazendo com que a vinhaça possa ser contemplada como um recurso para finalidades elétricas.

Tabela 17 – Comparação dos resultados dos *cases* estudados.

PONTOS EM COMUM	<i>CASE I</i>	<i>CASE II</i>	<i>CASE III</i>
Geração de energia elétrica a partir do biogás da vinhaça	<ul style="list-style-type: none"> - Diminui os impactos ambientais; - Reduz perdas de energia durante sua transmissão e distribuição; - Redução do consumo de recursos naturais para gerar energia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de geração de eletricidade anual: 45,78MWh/dia - Digestão anaeróbia é potencialmente adequada para projetos de bioenergia em biorrefinarias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Norte do estado de SP tem potencial de até 15189 MWh/ano para geração de energia; - 47,75% dos municípios do estado de SP apresentam um potencial maior que 0,83 GWh/ano;
Viabilidade econômica do uso da biodigestão anaeróbia	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de ampliação do mercado com leilões para biomassa; - Termoelétricas de vinhaça são inviáveis aos preços praticados nos leilões do ACR (média: US\$ 64/MWh sem isenção fiscal). 	<ul style="list-style-type: none"> - Rentabilidade positiva a partir do valor do custo de fabricação; - Valor do investimento da implementação do processo de digestão anaeróbia: cerca de 972 mil USD; - Biodigestor representa 35% do valor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Os municípios com viabilidade econômica positiva representam cerca de 33% do total do estado; - Número de municípios viáveis para gerar energia elétrica aumenta para cerca de 44% do total.
Redução das emissões de GEE	<ul style="list-style-type: none"> - Apoio ao desenvolvimento sustentável; - Mitigação das emissões de GEE no meio ambiente; - Aumento do uso de biocombustíveis na matriz energética contribui na redução das emissões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição de fontes externas de energia pela energia gerada do biogás; - Redução da pegada de carbono das usinas de etanol; - Estimativa da redução de emissão anual: 618,02 toneladas CO₂eq. 	<ul style="list-style-type: none"> - Benefício para a conversão da vinhaça em biogás; - Promoção do desenvolvimento sustentável no estado de São Paulo; - Redução com linhas de transmissão e perdas de energia.

Fonte: Autoral, 2022.

5 Conclusão

A biodigestão da vinhaça ainda é um assunto que vem sendo estudado e desenvolvido a cada ano. Diversos autores discutem o aproveitamento da sua capacidade energética atrelado a diminuição de sua carga poluidora. A gestão dos resíduos advindos da produção de etanol se torna um problema diante da grande quantidade gerada e da maneira como são descartados. Por isso, a expansão desse assunto incentiva a indústria sucroalcooleira, uma vez que este setor é um dos principais para a economia do país.

A produção de biogás em usinas a partir de seus resíduos possibilita otimizar energia e manter a sustentabilidade ambiental no setor. De acordo com a literatura, durante a produção de biogás a eficiência do uso da vinhaça como substrato se compara ao uso de estrume, pois os dois produzem uma quantidade significativa de metano.

Por mais que o Brasil seja um dos maiores produtores de etanol do mundo, a tecnologia da biodigestão anaeróbia para geração de biogás ainda é pouco explorada. Apesar disso, o uso do biogás tem crescido gradativamente, após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos que determina que o setor público e privado realize a gestão de seus resíduos, evitando que estes sejam descartados de maneira incorreta, podendo haver inclusive a exploração energética dos mesmos.

Mais incentivos vieram através da Política Nacional de Biocombustíveis, que a partir da produção e comercialização de biocombustíveis gera-se créditos de carbono. O direito ao saneamento básico também contribui para a produção de biogás, visto que a obrigatoriedade do tratamento de esgoto faz com que as autoridades responsáveis utilizem desse resíduo para se obter biogás.

Devido a grande quantidade de vinhaça gerada a cada litro de etanol produzido, essa se torna mais uma dentre os diversos resíduos que são capazes de terem seu potencial energético aproveitado. Além disso, tem-se a possibilidade de expansão da matriz energética brasileira com fontes renováveis de diferentes resíduos.

Portanto, a ideia principal foi apresentar os benefícios da biodigestão da vinhaça, com a finalidade de mostrar que é viável, vantajosa e importante (de forma ambiental e econômica) a opção da reutilização de resíduos dentro da indústria. Sendo assim, espera-se que uma nova configuração de biorrefinarias seja estimulada no Brasil.

Referências

- ABIOGAS. *Potencial de biogás no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/potencial-de-biogas-no-brasil/>>. Acesso em: julho de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- ANEEL. *Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída*. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/aneelsala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>. Citado na página 65.
- ANP, A. N. do P. *Resolução ANP N° 19, DE 15.4.2015*. 2015. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-19-2015-2020-09-02-versao-compilada?origin=instituicao>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 19.
- ANP, A. N. do P. *Produção e fornecimento de biocombustíveis*. 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 19.
- ANP, A. N. do P. *Dados Estatísticos*. 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 20.
- ARAÚJO, G. J. F. D. et al. Análise de viabilidade econômica financeira do uso de vinhaça para geração de eletricidade no Brasil. *Cadernos EBAPE. BR*, SciELO Brasil, v. 18, p. 936–955, 2021. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/cadernosebape/article/view/82700/78717>>. Acesso em: março de 2022. Citado 3 vezes nas páginas 54, 55 e 56.
- BARROS, P. d. S.; BLUM, R. P. *Produção de etanol a partir do resíduo da batata proveniente da indústria alimentícia*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Citado na página 22.
- BERNAL, A. P.; SANTOS, I. F. S. dos. Estimativa do potencial energético a partir da digestão anaeróbia da vinhaça na cidade de Araraquara (sp). *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, n. 4, 2015. Citado na página 63.
- BOHRZ, G. I. et al. Geração de metano em lagoa anaeróbia: Um estudo de caso em abatedouro de bovinos. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Santa Maria, 2010. Citado na página 42.
- BONASSA, G. et al. Subprodutos gerados na produção de bioetanol bagaço torta de filtro água de lavagem e palhagem. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, n. 3, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- BONTURI, G. de L. et al. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. *Revista Ciências do Ambiente On-Line*, v. 8, n. 2, 2012. Citado na página 48.
- BRASIL, B. *Fundamentos da Digestão Anaeróbia de Substratos Agroindustriais*. 2020. Disponível em: <<https://url.gratis/nLszHf>>. Acesso em: outubro de 2021. Citado 3 vezes nas páginas 35, 38 e 39.

- BULLER, L. S. et al. A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 765, p. 142717, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972036246X>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 63.
- CAMPELLO, L. D. et al. Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, Springer, v. 23, n. 2, p. 2614–2629, 2021. Citado na página 58.
- CAMPO, N. *Usina de cana-de-açúcar investe em reuso da água no reaproveitamento da vinhaça*. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/nosso-campo/noticia/2020/08/02/usina-de-cana-de-acucar-investe-em-reuso-da-agua-no-reaproveitamento-da-vinhaca.ghtml>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 26.
- CAPES, P. *Portal de Periódicos CAPES/MEC*. 2021. Disponível em: <<https://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 51.
- CASSINI, S. T. et al. Biogás: biocombustíveis anp. *Biocombustíveis no Brasil: fundamentos, aplicações e perspectivas*. Rio de Janeiro: Synergia, v. 1, p. 135–167, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 45, 46, 47 e 48.
- CASTRO, N.; DANTAS, G. A conexão da bioeletricidade à rede: Quem paga. *Rio de Janeiro: Grupo de Estudos do Setor Elétrico*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- CHERNICHARO, C. d. L. t. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. *Reatores anaeróbios*, v. 5, p. 379, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- CIBIOGAS. *Panorama do Biogás no Brasil 2020*. 2020. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf>. Acesso em: julho de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- CONAB, C. N. de A. *Perfil do Setor do Açúcar e do Alcool no Brasil*. 2013. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: abril de 2022. Citado na página 24.
- CONTRERA, R. C. *Biometanização de Resíduos Sólidos Orgânicos*. 2017. Disponível em: <<http://neper.shs.eesc.usp.br/wp-content/uploads/2017/10/Apresentaç~ao-Digest~ao-Anaeróbia-Ronan-C-Contrera.pdf>>. Acesso em: outubro de 2021. Citado na página 50.
- COSTA, R. F. d. S. Produção de biogás a partir de vinhaça. *Dissertação de Graduação em Química Industrial*, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 29.
- CREMONEZ, P. A. et al. Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos¹. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 2, p. 21–35, 2013. Citado na página 39.
- ENERGY, E. *Soluções para Digestão Anaeróbia*. 2021. Disponível em: <<https://www.encenergy.com/pt/tecnologias-e-solucoes/digestao-anaerobia>>. Acesso em: outubro de 2021. Citado na página 49.
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>. Citado na página 66.

- EPE. *Matriz Energética e Elétrica*. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- EPE, E. D. P. E. Balanço energético nacional: Relatório síntese, ano base 2019. *Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia*, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- FILHO, P. L. D. Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de são paulo. *USP-Universidade de São Paulo*, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10062011-114743/publico/Paulo_Dantas.pdf>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 55.
- FRIGO, K. D. de A. et al. Biodigestores: seus modelos e aplicações. *Acta Iguazu*, v. 4, n. 1, p. 57–65, 2015. Citado na página 47.
- GENG, Y.; SARKIS, J.; BLEISCHWITZ, R. *How to globalize the circular economy*. Nature Publishing Group, 2019. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-019-00017-z>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 63.
- GOIÁS, I. *Impermeabilização e a Importância do Processo em suas Aplicações*. 2022. Disponível em: <<https://goiasimpermeabilizacoes.com.br/construcao/impermeabilizacao-e-a-importancia-do-processo-em-suas-aplicacoes/>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 44.
- GRANATO, E. F. Análise de viabilidade técnica e econômica da biodigestão anaeróbia da vinhaça. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016. Citado na página 57.
- GURGEL, M. N. d. A. et al. Tecnologia para aproveitamento de resíduos da agroindústria sucroalcooleira como biofertilizante organomineral granulado. 2012. Disponível em: <<https://url.gratis/QVJoA8>>. Acesso em: outubro de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 29.
- INPE. *Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite*. 2014. Disponível em: <dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>. Citado na página 63.
- KARLSSON, T. et al. *Manual Básico de Biogás*. 2014. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf>. Acesso em: julho de 2021. Citado na página 36.
- KHATIWADA, D. et al. Energy and ghg balances of ethanol production from cane molasses in indonesia. *Applied energy*, Elsevier, v. 164, p. 756–768, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915014828>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 59.
- LOPES, R. *Combustíveis e Biocombustíveis: Biogás*. Universidade de Brasília. Apresentação em slide. 2020. Acesso em: julho de 2021. Citado 4 vezes nas páginas 36, 42, 43 e 44.
- LORA, E.; VENTURINI, O. *Biocombustíveis*. [S.l.]: Editora Interciência, 2012. Volume 2. Citado 6 vezes nas páginas 14, 27, 28, 29, 30 e 31.

- LYRA, M. R. et al. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 7, p. 525–532, 2003. Citado na página 28.
- MICUANSKI, V. C. et al. *Viabilidade técnica e econômica da utilização da vinhaça para geração de energia elétrica (estudo de caso)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- MORAES, B. S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? *Applied Energy*, Elsevier, v. 113, p. 825–835, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913005849>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 55.
- NIKOLAUSZ, M.; KRETZSCHMAR, J. *Current Advances in Anaerobic Digestion Technology: Applications in Food, Environmental Remediation and Bioengineering*. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Disponível em: <<https://dlib.hust.edu.vn/bitstream/HUST/18926/1/OER000001512.pdf>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 63.
- NOGUEIRA, C. E. C. et al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of paraná state, brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 48, p. 300–305, 2015. Citado na página 50.
- NOVO, L. P. *Novas perspectivas para uma biorrefinaria de cana-de-açúcar no Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- PARSAEE, M. e. K. et al. Uma revisão da produção de biogás da vinhaça de cana-de-açúcar. *Biomassa e bioenergia*, Elsevier, v. 122, p. 117–125, 2019. Citado na página 26.
- PENTEADO, M. C. et al. Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 3, n. 1, p. 26–33, 2017. Citado na página 49.
- PEREIRA, G. Viabilidade econômica da instalação de um biodigestor em propriedades rurais. *Departamento de Física, Estatística e Matemática DeTEC*, 2009. Citado na página 48.
- PEREIRA, I. Z. et al. Vinasse biogas energy and economic analysis in the state of são paulo, brazil. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 260, p. 121018, 2020. Citado na página 48.
- PEREIRA, I. Z. et al. Vinasse biogas energy and economic analysis in the state of são paulo, brazil. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 260, p. 121018, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/159521>>. Acesso em: março de 2022. Citado 5 vezes nas páginas 63, 64, 65, 66 e 67.
- PINTO, C. P. et al. Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável. [sn], 1999. Citado na página 14.

- POVEDA, M. M. R. *Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.
- PROPEQ. *Biocombustíveis: Etanol de Primeira Geração*. 2020. Disponível em: <<https://propeq.com/etanol-biocombustiveis/>>. Acesso em: maio de 2022. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- PROPEQ. *Etanol de segunda geração: o combustível do futuro?* 2020. Disponível em: <<https://propeq.com/etanol-de-segunda-geracao/>>. Acesso em: maio de 2022. Citado na página 23.
- PROSPECÇÃO, C. de. *Revista Cadernos de Prospecção*. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/index>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 51.
- RIBEIRO, C. A.; BLUMER, S. A.; HORII, J. *Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira*. [S.l.]: USP/ESALQ/LAN, 1999. Citado na página 24.
- ROSSETTO, A. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, v. 2, p. 435–504, 1987. Citado na página 27.
- SCIELO. *Scientific Electronic Library Online*. 2021. Disponível em: <<https://scielo.org/>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 51.
- SCIENCEDIRECT. *ScienceDirect*. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 51.
- SEADI, T. A. Biogas handbook. Syddansk Universitet, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- SEBRAE, S. B. de Apoio às Micro e P. E. *Panorama Atual do Mercado de Cachaça Artesanal. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM*. 2008. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 25.
- SILVA, M. A. da et al. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 11, p. 108–114, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- SILVA, M. R. *Produção e caracterização do biogás de vinhaça com dejetos de bovinos visando a geração de energia e de biofertilizante*. Tese (Doutorado) — Produção Vegetal— Universidade Estadual do Norte, 2015. Citado 9 vezes nas páginas 24, 25, 26, 41, 43, 45, 46, 47 e 48.
- SILVA, V. L. d. Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009. Citado na página 31.
- SILVEIRA, E. d. Vinhaça para gerar energia. *Revista Pesquisa FAPESP*, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 14, 34 e 35.

- SOLAR, P. Fontes de energia alternativas. *PORTAL SOLAR*, 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/fontes-de-energia-alternativas>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 17.
- SOUZA, R. d. C. P. d. *Análise exergética da vinhaça para produção de biogás*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SÃO PAULO. *Departamento de Energia e Mineração. Eletricidade no estado*. 2018. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/energia-eletrica/energia-eletrica-no-estado/>>. Citado na página 66.
- TENA, M. et al. Techno-economic evaluation of bioenergy production from anaerobic digestion of by-products from ethanol flex plants. *Fuel*, Elsevier, v. 309, p. 122171, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121020470>>. Acesso em: março de 2022. Citado 6 vezes nas páginas 57, 58, 59, 60, 61 e 62.
- TOTAL, I. *Geomembrana*. 2022. Disponível em: <<https://impermeabilizaciantotal.com.pe/geomembrana-2/>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 44.
- TURTON, R. et al. *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education, 2008. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=kWXyhVXztZ8C&oi=fnd&pg=PT3&ots=p_nSxErOyG&sig=s-J2uiT99CuJPoaRvIdp_QaVc2Q&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: maio de 2022. Citado na página 62.
- UNICA. *Etanol Energia Sustentável*. 2021. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>>. Citado na página 63.
- UNICA, U. da Indústria de cana-de-açúcar. *Etanol Energia Sustentável*. 2020. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 20.
- VIANA, D. *Reatores UASB: entenda seu funcionamento*. 2019. Disponível em: <<https://www.guiadaengenharia.com/reatores-uasb/>>. Acesso em: outubro de 2021. Citado na página 40.
- VIDAL, M. d. F. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. Banco do Nordeste do Brasil, 2019. Disponível em: <<https://url.gratis/R5fuIv>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- VIDAL, M. d. F. Produção e mercado de etanol. 2020. Disponível em: <<https://url.gratis/R5fuIv>>. Acesso em: agosto de 2021. Citado na página 14.
- VILAR, D. da S. Células combustíveis: Uma visão tecnológica sobre biogás. *Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica*, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- VILELA, F. R. *Biometanização: estudo da influência do lodo e da serragem no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU)*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 49.

ZHANG, W. *Techno-Economic Analysis (TEA) and Environmental Impact Assessment (EIA) of corn biorefinery and bioprocessing operation*. Tese (Doutorado) — Iowa State University, 2017. Disponível em: <<https://dr.lib.iastate.edu/server/api/core/bitstreams/1166444c-3672-4b57-8136-6bbfd729926c/content>>. Acesso em: março de 2022. Citado na página 60.