

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Química - Câmpus de Araraquara

Alain Borges Piroutek

Estimativa de potencial de produção de biogás a partir da vinhaça
no estado de São Paulo

Araraquara - SP
2022

Alain Borges Piroutek

Estimativa do potencial de produção de biogás a partir da vinhaça
no estado de São Paulo

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires

Araraquara - SP

2022

FOLHA DE ROSTO (VERSO) – FICHA CATALOGRÁFICA

Alain Borges Piroutek

Estimativa do potencial de produção de biogás a partir da vinhaça
no estado de São Paulo

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Araraquara, 12 de janeiro de 2023.

Banca examinadora

Lorena Oliveira Pires

Prof.^a. Dr.^a. Lorena Oliveira Pires
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Leandro Martins

Prof. Dr. Leandro Martins
Instituto de Química – UNESP, Araraquara

Caroline Varella Rodrigues

Dr.^a. Caroline Varella Rodrigues
Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), em especial ao Instituto de Química, por me proporcionar essa graduação de qualidade de forma gratuita e pública.

À Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires, minha orientadora, por ter me auxiliado e guiado ao longo da construção deste trabalho, sempre se mostrando paciente e compreensiva durante nosso trabalho.

À minha família, meus pais, meu irmão, meus avós e meus padrinhos por terem sido tão importantes ao longo de minha vida e durante este curso de graduação. Com certeza sem vocês nada disso seria possível. Em especial aos meus avós Alexandre e Nair, por terem sido cruciais em minha trajetória e na minha formação como pessoa.

À minha namorada por todo o apoio e companheirismo que me proporcionou ao longo destes anos de graduação. Sem seu suporte e diversos conselhos, não teria conseguido tomar algumas decisões das formas mais assertivas.

Aos meus irmãos de São Paulo, que me apoiaram em todas as decisões desde a de se mudar para o interior, dando todo o suporte que podiam para contribuir.

Aos meus irmãos da República Dominicana por terem compartilhado tantos momentos e experiências comigo durante esse período, além de terem me acolhido e me dado um novo lugar para chamar de casa.

Aos meus colegas de graduação, por terem passado por todos os desafios deste curso comigo e compartilharem as conquistas e as adversidades ao longo do mesmo.

E por fim, ao Diretório Acadêmico Waldemar Saffioti e à Química Jr, por terem me proporcionado experiências de aprendizado e amadurecimento durante minha participação nas entidades.

RESUMO

A sociedade atual demanda quantidades cada vez maiores de energia para sustentar seu estilo de vida e as evoluções tecnológicas alcançadas. Os combustíveis fósseis são responsáveis por mais de 80 % da matriz energética mundial. Com as atuais tendências e urgências de uma mudança nessa matriz energética, com o intuito de diminuir as emissões de gases de efeito estufa, a busca por alternativas renováveis se torna uma consequência imediata. Dentre as diversas formas de se produzir energia, o Brasil destaca-se como maior produtor mundial de etanol à partir da cana-de-açúcar. Assim, o principal resíduo gerado deste processo, a vinhaça, passa a apresentar elevado interesse biotecnológico por conter elevado teor orgânico e concentrações de nutrientes, sendo então utilizado em processos de digestão anaeróbia para a geração de biogás, já que este resíduo não pode ser descartado sem o devido tratamento. Este biogás possui um elevado teor energético e pode ser utilizado para gerar energia (elétrica, térmica ou mecânica) ou até ser purificado e produzir combustível gasoso similar ao gás natural, o biometano. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo realizar a estimativa do potencial de produção de biogás a partir da vinhaça produzida no estado de São Paulo. Os resultados indicaram que, caso toda a vinhaça produzida no estado de São Paulo em 1 ano, fosse tratada em um reator CSTR com um rendimento de aproximadamente $0,4 \text{ L}_{\text{CH}_4}/\text{L}_{\text{vinhaça}}$, seriam produzidos aproximadamente $1.240.844,4 \text{ mil m}^3 \text{ biogás/ano}$. Isso corresponde ao potencial de geração de $6.477,2 \text{ GWh/ano}$, que equivale a $4,9 \%$ do consumo de energia elétrica no estado de São Paulo e a $1,3 \%$ do consumo no Brasil, ambos registrados em 2021.

Palavras-chave: agroindustrial; digestão anaeróbia; metano; resíduo; vinhaça.

ABSTRACT

Today's society demands ever-increasing amounts of energy to sustain its lifestyle and the technological developments achieved. Fossil fuels are responsible for more than 80 % of the world's energy matrix. With the current trends and urgency for changes in this energy matrix. In order to reduce greenhouse gas emissions and the current trends and urgency of a change in the energy matrix, the search for renewable alternatives becomes an immediate consequence. Among the many ways producing energy, Brazil stands out as the world's largest producer of ethanol from sugar cane. Thus, the main residue generated from this process, vinasse, starts to present high organic content and nutrient concentrations, being then used in anaerobic digestion processes for the generation of biogas, since this waste can not be discarded without proper treatment. This biogas has a high energy content and can be used to generate energy (electrical, thermal or mechanical) or even be purified to produce a gaseous fuel similar to natural gas, the biomethane. Thus, the objective of this work was to estimate the potential for biogas production from vinasse produced in the state of São Paulo. The results indicated that if all the vinasse produced in the state of São Paulo in 1 year, were treated in a CSTR reactor with a yield of approximately $0,4 \text{ L CH}_4 / \text{L vinasse}$, approximately 1.240.844,4 thousand $\text{m}^3 \text{ biogas} / \text{year}$ would be produced. This corresponds to the generation potential of 6.477,2 GWh / year, which is equivalent to 4,9 % of the electricity consumption in the state of São Paulo and 1,3 % of the consumption in Brazil, both recorded in 2021.

Keywords: agroindustrial; anaerobic digestion; methane; residue; vinasse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética mundial em 2019.....	13
Figura 2: Matriz energética brasileira em 2019.....	14
Figura 3: Exemplares de cana-de-açúcar em uma plantação.	15
Figura 4: Açúcar e etanol, dois exemplos de produtos vindos da cana-de-açúcar.	16
Figura 5: Fluxograma do processo de obtenção de açúcar e de etanol.....	18
Figura 6: Histórico de produção de açúcar, em Mton, por região nas últimas safras brasileiras.....	19
Figura 7: Histórico de produção de etanol, em milhões de m ³ , por região nas últimas safras brasileiras.	20
Figura 8: Torta de filtro formada no processo de moagem da cana.	21
Figura 9: Bagaço de cana-de-açúcar.	22
Figura 10: Lagoa de usina de cana-de-açúcar destinada para resfriamento de vinhaça.....	24
Figura 11: Representação de um biodigestor de lagoa coberta.....	32
Figura 12: Representação de um biodigestor UASB.....	33
Figura 13: Representação esquemática de reator CSTR e seus possíveis sistemas de agitação.....	35
Figura 14: Representação esquemática de um reator de leito fluidizado.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análises qualitativas e quantitativas das amostras de vinhaça coletadas na cidade de Araras (SP), em duas diferentes colheitas.....	26
Tabela 2: Valores obtidos para a estimativa de produção de biogás no estado de São Paulo.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFBR: *Anaerobic Fluidized Bed Reactors*

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BLC: Biodigestor de Lagoa Coberta

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CIBIOGAS: Centro Internacional de Energias Renováveis

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CSTR: *Continuous Stirred Tank Reactor*

DBO: Demanda Bioquímica de oxigênio

DQO: Demanda Química de oxigênio

EPA: *Environmental Protection Agency*

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

LQ: Limite de Quantificação

ONU: Organização das Nações Unidas

PVC: Policloreto de Vinila

SM21: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewates 21th Edition 2005;*

UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

USEPA: *United States Environmental Protection Agency;*

SUMÁRIO

1. Enunciado do problema	13
1.1. CENÁRIO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO.....	13
2. Cana de açúcar	15
2.1. PRODUTOS	18
2.1.1. Açúcar	18
2.1.2. Etanol	19
2.2. SUBPRODUTOS.....	20
2.2.1. Torta de filtro	20
2.2.2. Melaço	21
2.2.3. Bagaço	22
2.2.4. Vinhaça.....	23
3. Vinhaça	23
3.1. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	24
3.2. USOS E APLICAÇÕES	26
3.3. BIOGÁS.....	27
3.3.1. Purificação do biogás	29
3.4. PROCESSOS DE TRATAMENTO	30
4. Potencial de produção de biogás	39
5. Conclusão	41
6. Referências Bibliográficas	43
ANEXO A – Valores calculados para a estimativa de potencial de produção de biogás a partir da vinhaça	53

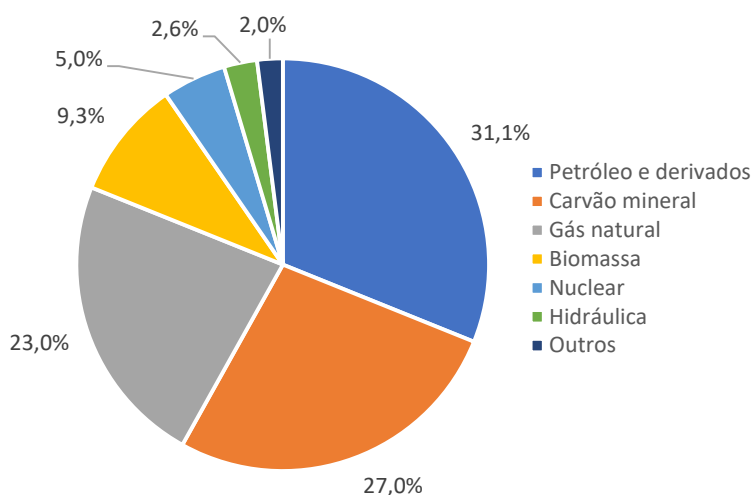
1. Enunciado do problema

1.1. CENÁRIO ENERGÉTICO MUNDIAL E BRASILEIRO

A sociedade atual demanda cada vez mais energia para continuar se desenvolvendo. Grande parte disso se deve por conta da utilização de combustíveis fósseis que desencadearam elevado consumo energético. Assim, a busca por crescentes fontes energéticas é uma consequência lógica, visto que para fornecer energia para transportes, residências, atividades agrícolas, indústrias e comércios a demanda energética se torna cada vez mais elevada (OLIVEIRA, 2022).

A matriz energética mundial baseia-se, principalmente, na utilização de combustíveis fósseis, que tem como característica o fato de serem não renováveis, sendo recursos finitos. A matriz mundial tem 31,1 % de sua contribuição proveniente do petróleo e seus derivados. O carvão mineral corresponde a 27 % e o gás natural a 23 %. Outras fontes de energia, como a biomassa, hidrelétrica, nuclear, entre outras, somam 18,9 % das fontes energéticas utilizadas no mundo (EPE, 2022). A Figura 1 ilustra a matriz energética mundial em 2019.

Figura 1: Matriz energética mundial em 2019.



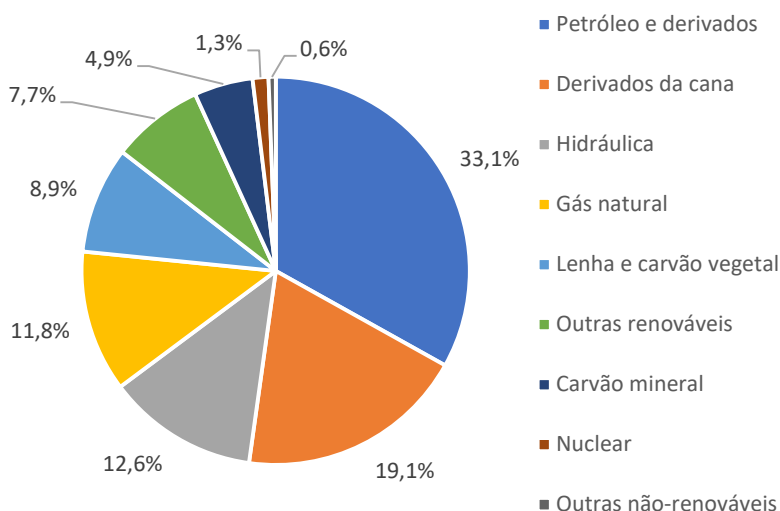
Fonte: Adaptado de EPE, 2022a.

Considerando alguns motivos como as crises climáticas recentes, o fato dos combustíveis fósseis terem uma emissão de gases de efeito estufa prejudicial ao meio ambiente e que os reservatórios dessas fontes energéticas estão presentes apenas em alguns locais do mundo, um processo de transição energética passa a

ser essencial. O foco deve ser dado em torno das energias de fontes renováveis, visto que essas são de recursos não finitos e também menos prejudiciais ao meio ambiente (DE SOUZA; NOGUEIRA, 2022).

A matriz energética brasileira se diferencia da mundial, devido à sua vasta extensão territorial e variedade de clima e relevo (DE SOUZA; NOGUEIRA, 2022). Sua maior fonte de energia ainda é o petróleo e seus derivados (33,1 %). Porém, outras energias ocupam os próximos degraus da matriz brasileira, dentre elas os derivados da cana-de-açúcar (19,1 %) e a hidrelétrica (12,6 %) (EPE, 2022). A Figura 2 representa a matriz energética brasileira.

Figura 2: Matriz energética brasileira em 2019.



Fonte: Adaptado de EPE, 2022a.

A utilização e o incentivo para projetos que focam em energias renováveis caminham em conjunto com as metas de sustentabilidade estipuladas por organizações mundiais, como a ONU (Organização das Nações Unidas) (DE SOUZA; NOGUEIRA, 2022). O Brasil tem um potencial energético baseado em energias renováveis elevado. Dentro dos biocombustíveis brasileiros um de grande destaque é o etanol, que é produzido a partir da cana-de-açúcar e pode ser utilizado em veículos (OLIVEIRA, 2022). Outro é o biogás, que pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas, sendo que seu maior potencial se encontra na produção a partir de resíduos sucroenergéticos, principalmente pela vinhaça (EPE, 2022a).

2. Cana de açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta originária das regiões tropicais asiáticas, mais especificamente da Nova Guiné. Sendo uma integrante do grupo de gramíneas perenes altas, ela possui em torno de 2 a 6 metros de altura. Tem um caule não muito espesso coberto de folhas verdes e de longo comprimento, que também é a parte rica em sacarose (TORRES, 2021). A Figura 3 apresenta uma imagem de uma plantação de cana-de-açúcar.

Figura 3: Exemplos de cana-de-açúcar em uma plantação.



Fonte: UDOP, 2021.

A planta chegou em território brasileiro no início do século XVI, e teve sua primeira região de prosperidade no Nordeste. A cana é resultado de trabalho de engenharia genética e sofreu muitos cruzamentos até chegar na espécie conhecida atualmente. Seu cultivo é mais proveitoso em regiões tropicais e subtropicais, que possuem períodos quentes e chuvosos que favorecem o desenvolvimento da planta, assim como períodos frios e secos importantes para aumentar a concentração de sacarose em seu caule devido ao seu maior amadurecimento (SANTANA, 2021).

A região Nordeste tornou-se a maior produtora e fornecedora do principal produto da espécie obtido na época: o açúcar. Tal posto manteve-se até o século XVII. Atualmente, a principal região de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é a Sudeste, tendo como principal produto o álcool etílico, ou etanol. Este é destinado à utilização em bebidas alcoólicas ou como combustível. A região Sudeste possui o clima favorável para o desenvolvimento da cultura de cana, visto que possui duas estações bem distintas (TORRES, 2021; SANTANA, 2022).

Além destes dois produtos de grande importância, a cana-de-açúcar também é importante para outras finalidades, principalmente ao levar-se em consideração subprodutos gerados ao longo dos processos industriais que a envolvem. Entre estes destinos, estão a alimentação humana e animal, a fertilização de solos para a agricultura e a produção de energia (MEDINA, 2022). A Figura 4 mostra alguns dos produtos obtidos a partir da cana-de-açúcar.

Figura 4: Açúcar e etanol, dois exemplos de produtos vindos da cana-de-açúcar.



Fonte: SESI, 2021; BIODIESEL BRASIL, 2020.

As plantações de cana-de-açúcar são geralmente próximas às usinas de produção de açúcar, que, na maioria dos casos no Brasil, são anexas à destilarias de álcool, levando à obtenção dos dois produtos simultaneamente. A cana, após sua colheita, é lavada e encaminhada para as moendas e desfibradores, onde será esmagada por rolos e embebida com água para retirar o caldo presente dentro de seu caule. Dessa operação, origina-se o bagaço, que é encaminhado para caldeiras e utilizado para produzir energia elétrica, e o caldo, que segue adiante no processo industrial. O caldo após ser extraído da cana precisa passar por uma série de tratamentos físico-químicos para eliminação de impurezas, microrganismos e outras substâncias que podem prejudicar o processo, além de auxiliar na preservação da sacarose no caldo. Durante o tratamento é gerado um lodo que é encaminhado para um processo de filtração, onde pode-se recuperar uma certa quantidade de caldo, que retorna para o processo, e o restante é denominado de torta de filtro e pode ser utilizada como fertilizante na cultura da cana. (VILELA, 2013)

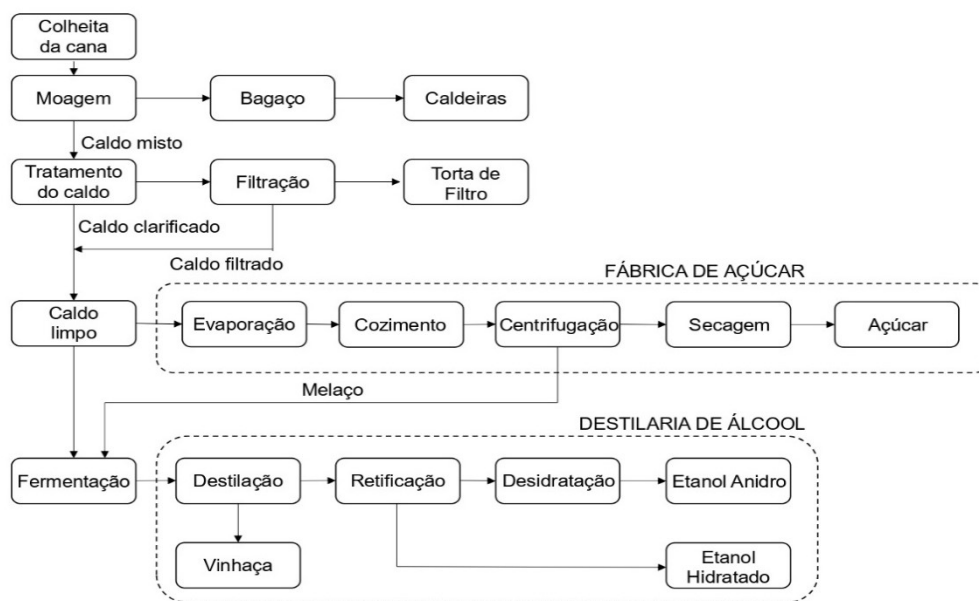
Então, esse caldo pode ser destinado ou para a produção de açúcar, ou para a produção de etanol, sendo geralmente encaminhado em proporções diferentes de acordo com a demanda do mercado. Para a formação do açúcar, o caldo deve

passar por processos de evaporação, cozimento e secagem para concentrar ao máximo a quantidade de sacarose presente no caldo e, posteriormente, cristalizá-lo, formando os cristais de açúcar. Dentro da produção de açúcar, é formado um subproduto denominado de melaço, que é misturado com o caldo direcionado para a produção de etanol por possuir açúcar e poder ser utilizado como alimento para as leveduras fazerem o processo de fermentação. (VILELA, 2013)

A mistura entre o caldo e o melaço forma o mosto, no qual adiciona-se as leveduras, que realizam o processo de fermentação em grandes tanques chamados de dornas e produzem o mosto fermentado, ou vinho. Esse vinho passa por um processo de destilação, no qual a mistura de água e álcool (formado no processo de fermentação) evapora através de seu aquecimento, e o que resta do vinho é denominado de vinhoto, ou vinhaça. Essa mistura de água e etanol pode ser encaminhada para o armazenamento ainda com a água presente, sendo o produto o etanol hidratado. Ou então, ele pode ser desidratado a fim de se obter o etanol anidro. (VILELA, 2013)

A Figura 5 apresenta um fluxograma resumido dos processos e etapas da produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar.

Figura 5: Fluxograma do processo de obtenção de açúcar e de etanol.



Fonte: Adaptado de VILELA, 2013.

2.1. PRODUTOS

2.1.1. Açúcar

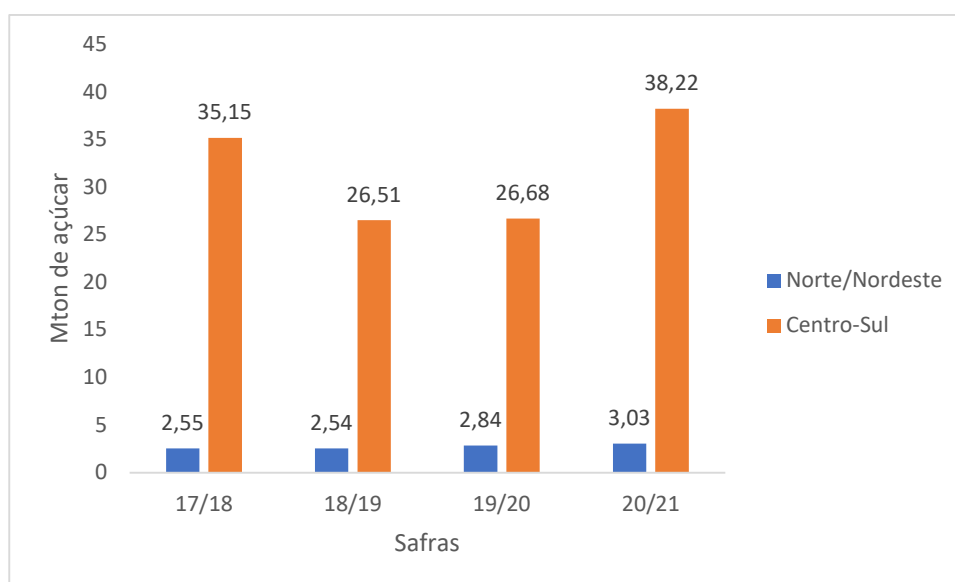
O açúcar é um dos principais produtos formados a partir da cana-de-açúcar. Presente em abundância nos caules da planta como sacarose ($C_{12}H_{24}O_{12}$), ela é extraída, concentrada e cristalizada para sua posterior comercialização. Além da cana-de-açúcar, pode-se obter açúcar a partir de outras matérias-primas, como a beterraba. O açúcar, após passar pelo processo de refinamento, torna-se uma das substâncias comercializadas mais puras, tendo acima de 99,9% de concentração de sacarose na maioria dos produtos (CASTRO, 2013).

A maior parte da produção de açúcar é destinada para a alimentação, podendo ser destinado a grandes indústrias alimentícias, ou ir para a mesa dos consumidores através da venda à granel. Porém, pode ser utilizados também para outras finalidades, como na produção de surfactantes e plastificantes (CASTRO, 2013).

O Brasil produziu em torno de 41 milhões de toneladas de açúcar na safra 2020/21 de cana-de-açúcar, o que representa um aumento de 39 % com relação à safra passada. Esse valor representa aproximadamente 20 % de todo o açúcar produzido no planeta vindo da safra de 2020/21. Dessas 41 milhões de toneladas, aproximadamente 30 milhões foram destinadas à exportação, sendo que os países

que importaram o maior volume foram: China, Argélia, Bangladesh, Índia e Indonésia. O principal estado produtor é São Paulo, sendo que a região Centro-Sul é a responsável pela maior parte da produção no país (NACHILUK, 2021). A Figura 6 ilustra o histórico de produção de açúcar das últimas safras no Brasil.

Figura 6: Histórico de produção de açúcar, em Mton, por região nas últimas safras brasileiras.



Fonte: Adaptado de Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022a.

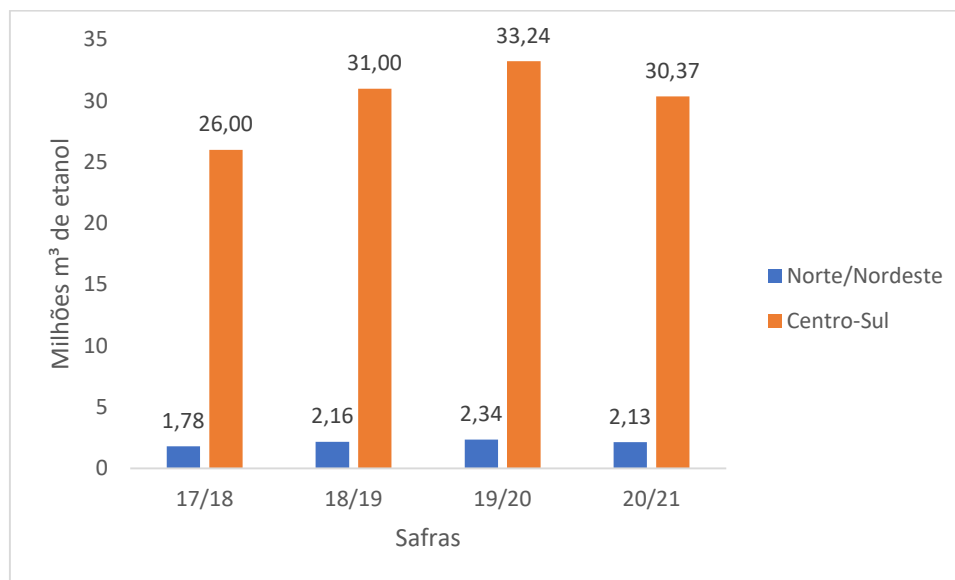
2.1.2. Etanol

O álcool etílico, ou etanol, é um biocombustível altamente utilizado para veículos de pequeno a médio porte. Pode ser produzido a partir da cana-de-açúcar, da beterraba, do milho e até de outras biomassas, desde que sejam ricas em carboidratos, para que estes possam ser utilizados como alimento por microrganismos que realizam a fermentação alcoólica e formam o álcool como produto. (FRANCISCO, 2022)

O Brasil produziu aproximadamente 32 milhões de m³ de etanol na safra de 2020/21, sendo mais da metade desse volume de etanol hidratado e o etanol anidro, que é o álcool desidratado, corresponde a aproximadamente 10 milhões de m³. Ao comparar este número com a produção da safra anterior, é nítido uma queda de quase 10 % no volume de produção. Tal fato pode ser explicado pela pandemia causada pela Covid-19, que fez muitas pessoas permanecerem em casa e não utilizarem seus veículos para deslocamento. Dentro deste cenário, as usinas de cana-de-açúcar deram preferência por utilizar a planta para a produção de açúcar,

visto que o etanol teve uma queda abrupta em sua procura (EPE, 2021). A Figura 7 evidencia a produção de etanol no Brasil ao longo dos últimos anos.

Figura 7: Histórico de produção de etanol, em milhões de m³, por região nas últimas safras brasileiras.



Fonte: Adaptado de Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022b.

2.2. SUBPRODUTOS

2.2.1. Torta de filtro

Um dos subprodutos das usinas de cana-de-açúcar é o bagaço. Após o caldo passar por um tratamento e ser filtrado, para garantir sua clarificação, os compostos remanescentes são o lodo de decantação desse processo de filtração, e o bagaço moído, que foi inserido na filtração para melhorar sua superfície de contato durante a operação unitária (JÚNIOR *et al.*, 2011).

Essa torta de filtro tem um grande valor econômico para o processo, pois possui uma grande quantidade de matéria orgânica que pode ser aproveitada na parte de fertilização da própria cultura de cana do ciclo. Além de que ela é formada em grandes proporções ao longo do processo de moagem da cana, sendo uma massa de 30 a 40 kg de torta de filtro para cada tonelada de cana que foi moída. A Figura 8 ilustra as grandes quantidades formadas de torta de filtro nas usinas de açúcar (JÚNIOR *et al.*, 2011).

Figura 8: Torta de filtro formada no processo de moagem da cana.



Fonte: (MK2R, 2015).

Devido à grande quantidade do elemento fósforo em sua composição, ela é altamente eficaz na manutenção de características férteis e no condicionamento de solos para a produção agrícola. Sendo assim, é um subproduto de alta riqueza dentro do processo de plantação da cana-de-açúcar (JÚNIOR *et al.*, 2011).

2.2.2. Melaço

O melaço é um subproduto da indústria do açúcar, mas, como geralmente as usinas de açúcar são localizadas próximas à destilarias de álcool, esse melaço se torna um insumo da produção de açúcar, principalmente na etapa de fermentação. Isso é explicado pelo fato de o melaço ser altamente rico em carboidratos utilizados pelas leveduras como matéria-prima para a fermentação, além de possuir também minerais que auxiliam neste processo fermentativo (FELTRIN *et al.*, 2000).

São produzidos, aproximadamente, 40 a 60 kg de melaço para cada tonelada de cana que entra no processo industrial. Este subproduto do açúcar também possui outras aplicações, principalmente em processos biotecnológicos devido à sua alta capacidade de fornecer carbono para microrganismos, como na produção de antibióticos, rações e pães (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Apesar de possuir composição bastante variável, num geral, o melaço possui em torno de 50 % de sua composição em carboidratos. Por isso é uma fonte de

carbono tão utilizada em processos fermentativos. Outro fator que torna este subproduto tão importante em termos econômicos, é ser uma matéria-prima de custo relativamente baixo e ter grande disponibilidade (GALLARDO, 2010).

2.2.3. Bagaço

O bagaço é um subproduto da cana-de-açúcar formado logo no início do processo industrial, como resultado do processo de moagem da cana. Este material fibroso é resíduo produzido em maiores quantidades em solo brasileiro, levando em consideração processos agroindustriais. Em média, são geradas de 5 a 12 milhões de toneladas de bagaço por ano no Brasil (SILVA et al., 2007a). A Figura 9 ilustra o subproduto da cana de açúcar.

Figura 9: Bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: FERREIRA, 2017.

O bagaço pode ter diversos destinos e é um resíduo com importante valor econômico. As usinas sucroalcooleiras podem utilizá-lo para a geração de energia elétrica através de sua queima em caldeiras, auxiliando na demanda energética do processo. Além da energia elétrica, outros possíveis destinos para o bagaço são a fabricação de papel, biomassa adsorvente de contaminantes orgânicos, ração animal, entre outros. Este resíduo também é muito utilizado para a produção de etanol de segunda geração (SILVA et al., 2007a), um combustível que tem a mesma composição química do etanol comum. Neste caso o bagaço já utilizado é reaproveitado por meio de processos como pré-tratamento e hidrólise, que permitem o acesso aos açúcares ainda contidos nas fibras.

O bagaço possui em sua estrutura celular a celulose e a lignina, que formam uma camada de proteção contra agentes externos. Esses dois materiais são difíceis de serem quebrados, o que é uma das dificuldades de se produzir o etanol de segunda geração, visto que é necessário romper a estrutura celular do bagaço para dar continuidade com o processo a partir das substâncias formadas pelas quebras das cadeias de polissacarídeos e seguir para a fermentação das mesmas (ROSA; GARCIA, 2009).

2.2.4. Vinhaça

A vinhaça, também conhecida como vinhoto ou restilo, é um dos subprodutos do processo de obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Calda resultante do processo de destilação do licor de fermentação do álcool, este líquido residual possui uma alta capacidade poluente, mas também possui elevado valor fertilizante por conta de sua grande quantidade de nutrientes (SILVA *et al.*, 2007b).

3. Vinhaça

De modo geral, para cada litro de álcool etílico produzido a partir da destilação fracionada da garapa, ou caldo da cana-de-açúcar, são gerados algo em torno de 12 a 20 litros de vinhaça (BULLER *et al.*, 2021). Tal líquido possui como característica uma consistência pastosa e um aroma desagradável. Devido ao fato de possuir uma alta concentração de nutrientes, em muitas usinas de açúcar e álcool, a vinhaça gerada no processo é encaminhada para a cultura da cana-de-açúcar, onde atua como fertilizante em conjunto com a torta de filtro, outro subproduto do processo com alta concentração de nutrientes. Além disso, a partir de sua utilização para a prática de fertirrigação da cultura de cana trazer benefícios econômicos, também gera benefícios ao meio ambiente, pois evita o descarte inapropriado de um produto altamente poluente e reduz a utilização de fertilizantes químicos (NOVACANA, 2022).

A vinhaça geralmente é gerada a uma temperatura elevada, sendo necessário um processo de resfriamento da mesma antes da sua utilização para outro intuito. Tal processo de resfriamento pode ser um processo industrial ou a partir de reservatórios onde essa vinhaça é despejada e passa por um processo de resfriamento natural, tendo sua temperatura abaixada num maior intervalo de

tempo (ALMEIDA, 2015). A Figura 10 mostra um exemplo de reservatório de vinhaça.

Figura 10: Lagoa de usina de cana-de-açúcar destinada para resfriamento de vinhaça.



Fonte: TADINI, 2016.

Após o resfriamento, a vinhaça pode ser reutilizada de algumas formas. Apesar de sua utilização para fertirrigação da cultura de cana ser a mais conhecida e utilizada atualmente, também pode-se produzir adubo sólido através de sua concentração ou até biogás por meio de sua digestão realizada por bactérias anaeróbias (ALMEIDA, 2015).

3.1. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

A vinhaça possui grandes quantidades de ácidos orgânicos em sua composição, ou seja, seu principal constituinte é a matéria orgânica. Além disso, também conta com a presença de outros íons, como potássio, magnésio e cálcio. A concentração de cada um desses íons e da matéria orgânica pode variar de acordo com a origem da vinhaça, visto que esta pode ser formada de diferentes maneiras, sendo algumas delas: a partir do melaço durante a produção de açúcar e a partir da destilação fracionada para produzir etanol. Sua formação se dá em temperaturas elevadas, podendo chegar a intervalos de 85 °C a 90 °C. (SILVA *et al.*, 2007b).

Mesmo dentro das diversas formas de se produzir vinhaça, ainda existem outras particularidades, como a possibilidade da matéria-prima ser a beterraba, a cana-de-açúcar ou até o milho. A vinhaça feita da cana de açúcar tende a

apresentar maiores concentrações de íons como o magnésio, o potássio e o cálcio, além de ter uma alta concentração de matéria orgânica. Já a vinhaça produzida a partir da beterraba possui maiores concentrações de sódio, o que é visto como uma substância nociva aos solos e plantas, reforçando o poder poluente desse subproduto (SILVA *et al.*, 2007b).

A vinhaça tem mais de 90 % de sua composição representada pela água. Esse caldo possui um pH ácido valorado entre 4,5 e 4,8, além de odor marcante e uma coloração amarronzada (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Possui também elevados valores de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), variando entre 12.000-20.000 mgL⁻¹ (BEBÉ *et al.*, 2009).

Diversos estudos já foram realizados com o intuito de caracterizar a vinhaça, para mensurar o impacto causado por este subproduto do etanol no meio ambiente. No estudo de Marinho *et al.* (2014), recolheu-se amostras de vinhaça das safras de 2010 e 2011 de uma plantação de cana-de-açúcar na cidade de Araras (SP) para obter a sua composição. Através de análises físico-químicas, encontrou-se os resultados apresentados na Tabela 1. Os resultados trazem a conclusão de que, mesmo sendo originais do mesmo local, as vinhaças possuem diferentes composições de acordo com sua safra (MARINHO, *et al.*, 2014).

Dentre todos os dados apresentados na Tabela 1, pode-se destacar que os valores de DBO e DQO presentes na vinhaça são bem elevados, ultrapassando nas duas amostras mais de 5.000 mg/L de DBO e 13.000 mg/L de DQO. Destaca-se também que a segunda amostra continha uma quantidade de resíduos não filtrados e dureza menor que a primeira, que apresentou, respectivamente, 2.765 mg/L e 2.493 mg CaCO₃/L. Já a primeira amostra apresentou uma menor quantidade de sulfato que a segunda, que evidenciou 2.993 mg/L (MARINHO, *et al.*, 2014).

Tabela 1: Análises qualitativas e quantitativas das amostras de vinhaça coletadas na cidade de Araras (SP), em duas diferentes colheitas.

Parâmetros	1ª amostra (2010)	2ª amostra (2011)	CETESB [mg/L]*	Método de análise
Amônia [mg/L]	< LQ (0,12)	< LQ (0,12)	-	USEPA 440/5-85-001
Arsênio [mg/L]	< LQ (0,04)	< LQ (0,40)	0,01	SM21 3120 B
Bário [mg/L]	0,41	< LQ (0,05)	0,7	SM21 3120 B
DBO [mg/L]	5046	7941	-	SM21 5210 B
Cádmio [mg/L]	< LQ (0,003)	< LQ (0,03)	0,005	SM21 3120 B
Cálcio [mg/L]	719	671	-	SM21 3120 B
Crômio [mg/L]	0,04	3,56	0,05	SM21 3120 B
DQO [mg/L]	13.380	25.225	-	SM21 5220 D
Cobre [mg/L]	0,35	0,76	2	SM21 3120 B
Condutividade elétrica [μ S/cm]	13.530	15.110	-	SM21 2510 B
Dureza [mg CaCO ₃ /L]	2.493	276	-	SM21 2340 B
Nitrogênio Kjeldahl [mg/kg]	267	171	-	SM21 4500-Norg B
Chumbo [mg/L]	< LQ (0,03)	< LQ (0,28)	0,01	SM21 3120 B
Magnésio [mg/L]	237	264	-	SM21 3120 B
Mercurio [mg/L]	0,0019	< LQ (0,005)	0,001	EPA 7470 ^a
Molibdênio [mg/L]	0,008	< LQ (0,02)	0,07	SM21 3120 B
Níquel [mg/L]	0,03	< LQ (0,05)	0,02	SM21 3120 B
Nitrato [mg/L]	1,30	1,49	-	SM21 4500-NO ₃ ⁻ F
Nitrito [mg/L]	0,008	0,033	-	SM21 4500-NO ₂ ⁻ B
Resíduos não-filtrados [mg/L]	2.765	1.800	-	SM21 2540 D
pH	3,9	4,37	-	SM21 4500- H ⁺ B
Potássio [mg/L]	2.056	3.401	-	SM21 3120 B
Selênio [mg/L]	< LQ (0,10)	< LQ (0,50)	0,01	SM21 3120 B
Sódio [mg/L]	50,2	114	-	SM21 3120 B
Sulfato [mg/L]	710	2.993	-	SM21 4500-SO ₄ ⁻² E
Enxofre total [mg/L]	1.219	1.681	-	SM21 3120 B
Fosfato total [mg/L]	1,30	-	-	SM21 4500-P C
Zinco [mg/L]	1,66	< LQ (0,06)	5	SM21 3120 B

*Limites de detecção estabelecidos pela CETESB.

Fonte: Adaptado de MARINHO *et al.*, 2014.

3.2. USOS E APLICAÇÕES

A principal forma de se utilizar a vinhaça, atualmente, no Brasil é a fertirrigação. Por ter uma alta quantidade de matéria orgânica, ela é utilizada como adubo nas próprias plantações de cana de açúcar das indústrias em que é gerada, auxiliando no balanceamento de diversos nutrientes e de água também. No entanto, essa prática pode levar a problemáticas de longo prazo para as culturas

em questão (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Quando utilizada para adubação de culturas canavieiras, cerca de 150 m³ de vinhaça aplicadas na plantação podem adicionar para cada hectare do solo cerca de 108 kg de cálcio, 61 kg de nitrogênio e 343 kg de potássio (BEBÉ *et al.*, 2009).

A vinhaça também pode ser utilizada como combustível para geração de energia elétrica em caldeiras. Para ser utilizada dessa forma, ela precisa passar por um processo de concentração a partir da retirada de água de sua composição. Então, ela é encaminhada para as caldeiras e incinerada e a energia gerada pode ser reinserida no processo industrial, auxiliando na integração energética e na diminuição de gastos do projeto (ALMEIDA, 2015).

Outra possível forma de uso da vinhaça é a biodigestão deste material a partir da utilização de microrganismos anaeróbios. Estas bactérias utilizam a matéria orgânica da vinhaça como substrato para realizarem um processo de digestão que gera o biogás, que é utilizado para gerar energia a partir de sua queima. O biogás é constituído, principalmente, por metano. Este gás possui um elevado teor energético e é considerado uma fonte de energia renovável, visto que é produzido a partir de biomassa, e não de combustíveis fósseis, como o gás natural (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

3.3. BIOGÁS

O biogás é definido como uma mistura de gases que pode ser formado a partir do tratamento anaeróbio de diversos tipos de matéria orgânica, como a vinhaça. Sua composição não é fixa e pode sofrer variações de acordo com o substrato utilizado em sua geração, e com a configuração de biogestor ou reator utilizado. Alguns dos gases presentes em maiores quantidades no biogás são: o metano (CH₄), que pode variar entre 50 a 80 % de sua composição; o hidrogênio (H₂); e o dióxido de carbono (CO₂) (LOBATO, 2011).

O biogás pode ser utilizado como fonte de energia, e é o que acontece no contexto brasileiro já há algumas décadas. Ele pode ser produzido a partir de diversos substratos e pode ter diferentes direcionamentos como produto, podendo ser queimado para produzir energia, ou ser purificado para produção de biometano

e ser utilizado como combustível de veículos. Devido ao fato de ser uma fonte de energia obtida de maneira renovável, pois é produzido a partir de substâncias renováveis (como a vinhaça e os resíduos sólidos urbanos), este gás tem ganhado muita relevância no cenário energético, tanto nacional, quanto global (KUNZ *et al.*, 2019)

Outro ponto favorável para o desenvolvimento do cenário de biogás no Brasil é por conta do crescimento do mercado de créditos de carbono, visto que este combustível auxilia na redução de emissão de gases de efeito estufa, estimula o processo de independência de fontes fósseis de energia e ainda auxilia no controle de emissão do gás metano de aterros e outros substratos ricos em matéria orgânica. Sendo assim, ele é um importante vetor para acelerar o processo de descarbonizar o setor energético (LIMA *et al.*, 2022).

O potencial calorífico do biogás pode variar de 15 a 30 MJ/Nm³, de acordo com sua pureza e composição, sendo que quanto maior for a quantidade de metano presente, maior será seu potencial. Existem alguns gases que causam alterações neste potencial, sendo eles alguns contaminantes presentes em sua composição, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), a amônia (NH₃) e o dióxido de carbono (CO₂) (KUNZ *et al.*, 2019).

Um dos maiores interferentes do potencial de geração de energia do biogás é o CO₂, podendo ter em torno de 20 a 30 % do volume do gás total. Essa interferência ocorre devido ao fato de o CO₂ ser inerte durante uma reação de combustão. O H₂S é outro contaminante do biogás, mas este é mais perigoso pois pode ser tóxico para o ser humano. Exposições contínuas a este gás podem gerar náuseas, tonturas e irritações nas mucosas, além de dores de cabeça e até paradas respiratórias em casos de exposição a altas concentrações de H₂S. O NH₃ pode gerar óxidos de nitrogênio (NO_x) durante o processo de combustão do biogás, que podem trazer problemas de respiração para as populações das redondezas e também provocar chuvas ácidas (KUNZ *et al.*, 2019).

3.3.1. Purificação do biogás

Com o intuito de se obter um combustível com qualidade na geração de energia, tendo uma quantidade menor de interferentes e contaminantes, é realizado o processo de purificação do biogás. Esse tratamento garante um maior potencial calorífico do combustível gasoso em sua queima a partir da retirada de seus principais contaminantes e um aumento na concentração de gás metano, o que leva a uma nova nomenclatura do combustível como biometano. (KUNZ, *et al.*, 2019).

O biometano é um combustível que pode ser um substituto do gás natural, que em sua maior parte é metano, mas possui origem fóssil na extração de poços de petróleo e gás. Sendo assim, ele tem as mesmas propriedades do combustível fóssil e emissão de gases de efeito estufa menor devido à sua origem, podendo ser inserido nas linhas de distribuição, que são os gasodutos, e utilizado como fonte de energia para veículos de grande porte, como caminhões e ônibus (KARLSSON *et al.*, 2014).

A purificação do biogás consiste, em suma, na retirada de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e de dióxido de carbono (CO_2) através de lavagens pressurizadas. Dessa forma, a concentração de metano (CH_4) do gás aumenta e o combustível é melhor aproveitado, de acordo com a finalidade desejada (KARLSSON *et al.*, 2014). O biogás pode ser tratado para alcançar duas faixas de concentração de CH_4 , sendo que cada uma delas permite a utilização de uma forma diferente do combustível. Quando o biogás atinge entre 35 e 70 % de metano em sua composição, este pode ser usado para geração de energia elétrica, térmica e mecânica. Já para concentrações de 94 a 99 % de CH_4 , que acontecem após processos de purificação mais específicos, o combustível pode ser injetado nos gasodutos como gás natural e ser utilizado como combustível para veículos (KUNZ *et al.*, 2019).

A água geralmente é removida nas primeiras etapas de purificação em processos mais simples a partir da condensação, ou até de secagem. Já o H_2S é removido a partir de processos químicos, biológicos ou físicos, sendo importante alcançar os limites permitidos pelos órgãos fiscalizadores, como a Agência

Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP). A remoção do H₂S pode ser feita durante a digestão anaeróbia, através de processos com materiais de adsorção, como o carvão ativado ou zeólitas sintéticas. Esses processos fazem com que este contaminante chegue a menos de 0,005 ppm na composição do biogás. O CO₂ pode ser removido durante o processo de dessulfurização do gás, no qual pode se utilizar de sistemas de lavagem que carregam e retiram do gás alguns contaminantes, ou podem utilizar de membranas que retém grande parte do CO₂, do NH₃ e do próprio H₂S (KUNZ *et al.*, 2019).

3.4. PROCESSOS DE TRATAMENTO

Devido a suas características tóxicas e recalcitrantes, a vinhaça excedente do processo de fertirrigação precisa passar por uma etapa de tratamento antes de ser descartada no ambiente. O processo de digestão anaeróbia reduz a poluição gerada por este subproduto da cana e ainda tem como resultado a produção de energia a partir de uma fonte renovável. Além disso, os compostos inorgânicos presentes na vinhaça tratada ainda podem ser reutilizados para fertirrigação, visto que durante a digestão anaeróbia utiliza-se apenas de seus compostos orgânicos como matéria-prima (RAMOS *et al.*, 2022).

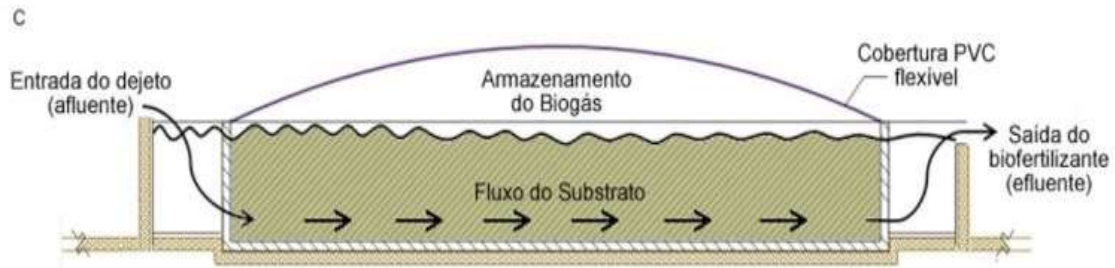
A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que pode ser dividido em algumas etapas, sendo elas: a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese (RAMOS *et al.*, 2022). A hidrólise consiste na quebra da matéria orgânica complexa (proteínas, lipídios e carboidratos) em micromoléculas, formando ácidos orgânicos, monossacarídeos e aminoácidos. Na etapa de acidogênese os compostos formados na etapa de hidrólise são utilizados por microrganismos anaeróbios para formar compostos intermediários através de processos de fermentação e oxidação anaeróbia. Dentre os compostos intermediários formados pode-se citar o propionato, o lactato e o butirato. A partir desses compostos da etapa anterior, durante a fase de acetogênese, bactérias acetogênicas produzem o acetato, H₂ e CO₂. E, por fim, os produtos da etapa anterior são utilizados como substrato pelas *archaeas* metanogênicas, que podem ser divididas em duas classes: as acetoclásticas, que produzem CH₄ a partir do acetato; e as hidrogênotróficas, que produzem CH₄ a partir de CO₂ e H₂. (KUNZ *et al.*, 2019)

Para que este processo ocorra é necessário utilizar um biodigestor. Existem inúmeros tipos de biodigestor, sendo eles caracterizados a partir de seu regime de alimentação, sistema de agitação, concentração de sólidos no reator e forma de alimentação. Alguns dos reatores, ou biodigestores, que podem ser utilizados são: o Biodigestor Lagoa Coberta (BLC), o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo cuja sigla em inglês é UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor*), o Reator Contínuo de Tanque Agitado, em inglês CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) e o de Reator de Leito Fluidizado (KUNZ *et al.*, 2019).

O BLC (Biodigestor Lagoa Coberta) consiste em um tanque impermeabilizado, visto que o processo de digestão é estritamente anaeróbio e não pode ter contato com o oxigênio, inserido em uma cavidade no solo, e envolto por um material, geralmente polimérico, que não permita a entrada de fluidos e que seja maleável para acumular o biocombustível gasoso formado sem que este seja rompido. É o biodigestor que possui o menor valor de investimento, por isso é muito utilizado no meio rural, principalmente para substratos provenientes da produção animal. Seu potencial de produção de biogás diário gira em torno do intervalo de $0,03-0,15 \text{ m}^3 \text{ biogás/m}^3 \text{ reator}$ (KUNZ *et al.*, 2019).

Esse reator não possui mecanismos destinados para um controle de sua temperatura, podendo sofrer flutuações de acordo com a temperatura ambiente, dificultando seu funcionamento em regiões mais frias. Além disso, pelo fato de nem sempre serem construídos com um fluxo de escoamento de sólidos remanescentes do reator, ele pode vir a ser descartado após um certo período de utilização devido a um grande acúmulo de lodo (matéria orgânica) em seu fundo. A Figura 11 mostra o esquema de um BLC.

Figura 11: Representação de um biodigestor de lagoa coberta.

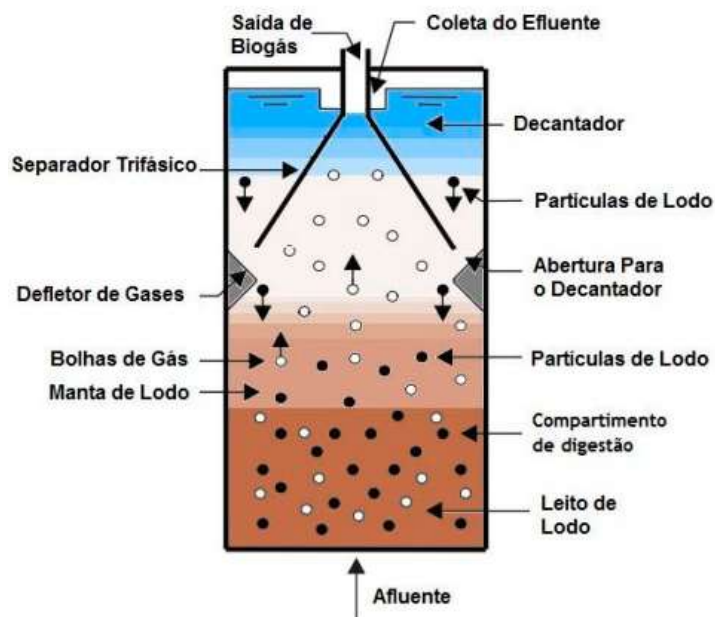


Fonte: LIMA, 2021.

Outro biodigestor é o reator UASB, que possui um separador trifásico no topo de sua estrutura, que realiza a segregação dos efluentes líquidos, da biomassa sólida e do biogás gerado no processo. Este separador se encontra no topo do reator devido ao fluxo ascendente de bolhas de gás, que são bombeadas no fundo de seu tanque. Essas bolhas carregam o lodo biológico (substrato orgânico) e também efluentes líquidos gerados durante o processo de digestão anaeróbia realizado por microrganismos presentes dentro do reator. O separador é essencial para que o lodo mais concentrado em matéria orgânica retorne ao fundo do reator para continuar seu processo de digestão e que o lodo menos concentrado seja removido em conjunto com os efluentes líquidos do processo (LOBATO, 2011).

O estado das bolhas de gás que ascendem é o líquido, mas ao chegarem ao topo do reator, se deparam com uma interface sólido-líquido, em que se forma uma fase gasosa. Esta fase gasosa, que é o biogás, deve ser direcionada por um sistema de dutos e levada para sua utilização como fonte de energia. É importante citar também que o lodo é distribuído dentro do reator a partir de sua densidade, sendo o lodo presente no fundo do reator mais denso e propício a sedimentação, e o lodo disperso pelo reator de menor densidade e menor concentração, devido ao elevado crescimento de bactérias anaeróbias ao longo do reator (LOBATO, 2011). A Figura 12 representa o esquema de funcionamento de um biodigestor UASB.

Figura 12: Representação de um biodigestor UASB.



Fonte: HIDRO-ETE, 2022.

Barcelos *et al.* (2022) realizaram um estudo para identificar critérios para o tratamento anaeróbio de vinhaça em reator UASB com leito fixo de calcário e temperatura de operação na faixa termofílica (40 °C a 70 °C). A vinhaça utilizada como matéria-prima neste estudo foi obtida na cidade de Dourados (MS). Foram utilizados dois reatores iguais UASB feitos de PVC e com capacidade total de 26,38 L, cada um deles com um leito fixo contendo 1,33 kg de calcário para cada litro de afluente, utilizado como agente alcalinizante, e inoculados com 15 L de dejetos bovino previamente peneirado. Os reatores tinham uma camisa de aquecimento de óleo mineral para manutenção da temperatura do sistema reacional. Durante o experimento, o sistema foi ajustado em três faixas de temperatura, todas elas com uma margem de erro de $\pm 2^\circ \text{C}$, sendo elas: a ambiente, de 26 °C; mesofílica, de 36 °C; e a termofílica, de 52 °C. A vinhaça foi diluída em água destilada para alcançar as concentrações de DQO estabelecidas como parâmetro para o experimento em diferentes etapas, variando de 0,02 a 1,70 g_{DQO}/L.dia. O rendimento de biogás foi calculado a partir das medidas obtidas de volume de biogás produzido e da quantidade em massa de material orgânico consumido entre as alimentações, calculada a partir da DQO consumida. Após um período de 48

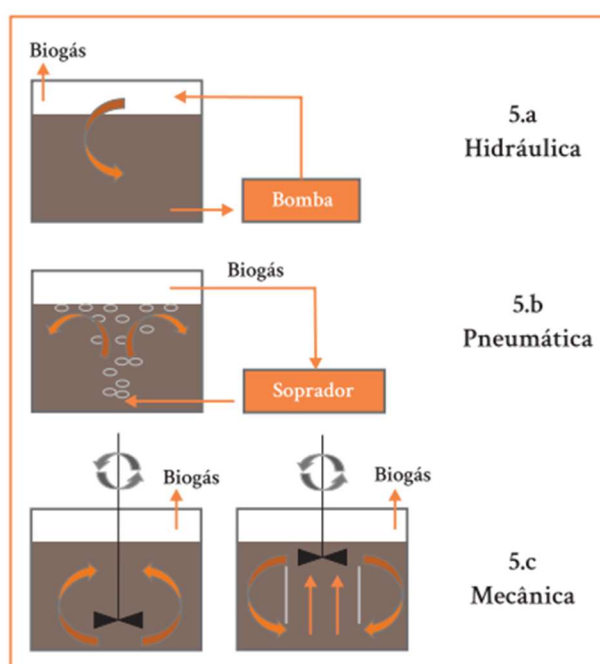
dias, o primeiro reator apresentou um rendimento de 0,11 L_{gás}/g_{DQO consumida} e o segundo reator apresentou um rendimento de 0,12 L_{gás}/g_{DQO consumida}.

Outro estudo realizado por Nery *et al.* (2018), utilizou de um reator UASB de PVC de volume total de 120 L e zona de reação de 60 L para degradar vinhaça e produzir biogás. O reator foi operado com uma taxa de recirculação de 1:3, com o intuito de ajustar a concentração do afluente com uma diluição a partir do efluente e diminuição da basicidade ideal para a operação do reator a partir da utilização de bicarbonato de sódio. O reator foi operado por 700 dias à temperatura ambiente do laboratório, que registrava 22 ± 3 °C, e houve a inoculação de 60 L de lodo granular. As taxas de alimentação de matéria orgânica aplicadas no reator variaram de 0,5 a 32,4 kg_{DQO}/m³.dia e de 0,5 a 39,0 kg_{DQO}/m³.dia, levando em consideração a taxa de recirculação do efluente. O tempo de detenção hidráulica no reator teve uma variação de 33,33 a 0,86 dias. O processo anaeróbio reduziu a matéria orgânica presente na vinhaça, mas não interferiu nos materiais inorgânicos, que são os nutrientes utilizados posteriormente na fertirrigação das plantações de cana. A eficiência de remoção de DQO ao longo do experimento foi de $87,5 \pm 5,3$ % para a DQO bruta e de $90,5 \pm 3,6$ % para a DQO filtrada. Comprovou-se que a taxa de recirculação do efluente contribuiu para aumentar a velocidade de fluxo ascendente do material contido no reator, além de influenciar na diluição da vinhaça. A produção de metano obtida foi de $0,299 \pm 0,066$ L_{CH₄}/g_{DQO removida}, o que corresponde a 76 % do rendimento teórico de $0,391 \pm 0,004$ L_{CH₄}/g_{DQO removida}. Através de uma análise regressiva, obteve-se que para a maior carga de matéria orgânica aplicada, que foi de 32,3 kg_{DQO}/m³.dia, o rendimento de metano esperado é de 6,4 a 9,6 L_{CH₄}/L_{reator}.dia.

O CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*) é o biodigestor mais utilizado para plantas de biogás que utilizam mais de uma fonte de substrato (codigestão), principalmente por conta de sua principal característica: a agitação contínua do conteúdo em seu interior. Dessa forma, o conteúdo presente dentro do reator permanece misturado durante todo período que estiver no recipiente, facilitando a homogeneização do substrato (KUNZ *et al.*, 2019).

Esse biodigestor possui um dos maiores investimentos em sua construção devido à aparelhagem destinada a mistura do sistema. No entanto, essa agitação gera uma maior interação entre os microrganismos presentes no sistema e a matéria orgânica utilizada como substrato, o que resulta num maior potencial de produção de biogás. A agitação pode ser realizada a partir de sistemas hidráulicos, pneumáticos ou mecânicos. (KUNZ et al., 2019). A Figura 13 representa o esquema de um reator CSTR com os possíveis sistemas de agitação.

Figura 13: Representação esquemática de reator CSTR e seus possíveis sistemas de agitação.



Fonte: KUNZ *et al.*, 2019.

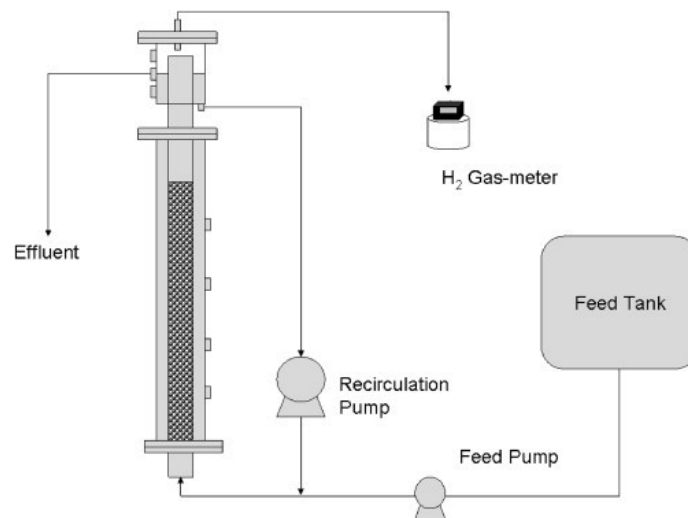
Em estudo conduzido por Bayu *et al.* (2022), foi investigado o desempenho da digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar, inoculada com dejetos bovinos digeridos e aclimatados, em temperatura termófila em dois reatores CSTR de estágio simples em paralelo, com um pH de $7,0 \pm 0,5$. O estudo foi simulado em um programa chamado *AQUASIMN software* e realizado com alimentações em diferentes taxas de matéria orgânica, sendo elas: 1,2; 1,8; e 2,4 g DQO/L.dia. A premissa de utilização da faixa de temperatura termófila passa pelo fato de que esse intervalo de temperatura permite uma alimentação de uma maior taxa de matéria orgânica do que a temperaturas mesófilas, o que influencia diretamente num maior rendimento na produção de biogás, e também da quantidade de metano

presente nele. O dejetos bovino digerido e aclimatado foi escolhido como inóculo devido à um estudo que reportou uma produção de 24,25 e 41,62 mL_{CH4}/dia proveniente deste material em um tempo de detenção hidráulica de 42 e 30 dias, respectivamente. Para cada uma das variações de taxa de alimentação de matéria orgânica, o processo durou 16 ± 1 dias e o experimento teve duração total de 111 dias, levando em conta os períodos de aclimação do inóculo antes de estar nas condições ideais de prosseguir com o experimento no reator. A taxa de produção de biogás do experimento foi de $0,724 \pm 0,046$ L_{biogás}/L_{reator.dia} e o rendimento de metano obtido foi de $0,392 \pm 0,06$ L_{CH4}/g_{DQO removida}.

Outro reator que pode ser utilizado no processo de degradação da vinhaça é o reator de leito fluidizado. Este tipo de configuração utiliza do conceito de fluidização, que consiste em um sistema que possui um fluxo ascendente de fluido que permeia partículas sólidas. Quanto maior for a velocidade empregada no sentido ascendente do fluido, maior será o arraste sofrido pelas partículas sólidas dentro do reator. Uma das grandes vantagens oferecidas por este tipo de reator é a possibilidade de operação contínua com controle facilitado, sendo este um reator apto para utilização em processos de larga escala. Nos reatores de leito fluidizado utilizados para processos de tratamento biológico, a biomassa forma a fase sólida (biofilme), muito similar ao que acontece nos reatores UASB (GEBARA, 2006).

Os reatores de leito fluidizado que utilizam da formação de biofilme em seu interior podem ser utilizados para o tratamento de cargas orgânicas e inorgânicas que possuem baixas concentrações de sólidos suspensos através do bombeamento de um afluente em direção às partículas com uma velocidade necessária para fluidizar o leito. Dentro deste leito fluidizado, a área superficial é otimizada e favorece, assim, o crescimento de microrganismos presentes no mesmo (GEBARA, 2006). A Figura 14 mostra um esquema de reator leito fluidizado.

Figura 14: Representação esquemática de um reator de leito fluidizado.



Fonte: Reis *et al.* (2015).

Em estudo realizado por Ramos *et al.* (2021), a eficiência da produção de H_2 e CH_4 a partir do tratamento de vinhaça por digestão anaeróbia foi avaliada. Foram empregados reatores de leito fluidizado (AFBR – *Anaerobic Fluidized Bed Reactors*) de dois estágios em diferentes temperaturas. A pesquisa foi realizada em três situações: 1 – reator de único estágio à temperatura termófila (40 a $70^\circ C$); 2 – dois reatores em sequência na faixa de temperatura termófila; 3 – reator a uma faixa termófila seguido de um na faixa mesófila (20 a $40^\circ C$). A estratégia foi iniciar a alimentação com vinhaça a uma taxa de $2,7 \text{ kg DQO/m}^3\cdot\text{dia}$, e na sequência aumentar essa taxa gradualmente. A vinhaça utilizada no experimento veio de três localidades: da usina São Martinho (Pradópolis/SP), da usina Ipiranga (Descalvado/SP) e usina Iracema (Iracemópolis/SP). A vinhaça de Pradópolis e Descalvado tinham uma DQO de $29,465 \pm 1471 \text{ mg/L}$, e a de Iracemópolis de $100,615 \pm 6034 \text{ mg/L}$, sendo esta última diluída até uma concentração de 20 g DQO/L antes de ser utilizada. A carga orgânica de alimentação teve variação, sendo que nas faixas de $2,7$ a $13,3 \text{ kg DQO/m}^3\cdot\text{dia}$ o último reator termófilo e o mesófilo tiveram desempenhos semelhantes na produção de CH_4 , tendo o com faixa de temperatura mesófila se destacado ao chegar numa faixa de $24,7 \text{ kg DQO/m}^3\cdot\text{dia}$, na qual apresentou produção de $3,2 \text{ L}_{CH_4}/\text{dia.L}$, com média de rendimento de $0,24 \text{ L}_{CH_4}/\text{g DQO}$.

No estudo feito por Reis *et al.* (2015), foi avaliado a produção de metano e hidrogênio a partir da vinhaça de cana-de-açúcar utilizando para seu tratamento um reator anaeróbio de leito fluidizado. O estudo foi realizado em dois reatores com carga orgânicas de diferentes concentrações, sendo um com 5 g DQO/L e outro com 10 g DQO/L, e operados em processo contínuo. Utilizou-se de dejetos suínos na inoculação do reator e a temperatura do procedimento foi de 22 ± 3 °C. A vinhaça utilizada neste experimento foi obtida na usina São Martinho, de Pradópolis/SP, e possuía uma concentração média de $42,818 \pm 4391$ g DQO/L, sendo diluída para alcançar os valores de 5 e 10 g DQO/L. De início, a fonte de carbono utilizada foi a glicose, mas esta foi substituída pela vinhaça que foi adicionada gradualmente até atingir as concentrações definidas para o experimento, sendo que a produção de CH₄ foi notada apenas quando a vinhaça substituiu totalmente a glicose como fonte de carbono, devido ao fato de que elevados valores de glicose diminuem a presença de microrganismos hidrogenotróficos. A maior produção de H₂ alcançada no experimento foi de 0,57 L_{H2}/h.L, sendo este valor alcançado quando se utilizou de 100 % de vinhaça como substrato e tempo de retenção hidráulica de 1 h. O biogás formado no experimento apresentou, em algumas etapas do processo, um pouco mais de 40 % em CH₄, um pouco mais de 50 % em H₂ e o restante de CO₂ dentro de sua composição. A presença de CH₄ e H₂ no biogás é mais eficiente na utilização do mesmo como combustível, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em sua queima.

Sendo assim, diversos trabalhos na literatura abordam o uso de vários tipos de biodigestores para o tratamento da vinhaça e retirada de sua matéria orgânica. Nota-se que os reatores biológicos utilizados estão conectados ao conceito de economia circular, visto que reduzem a carga orgânica do poluente, a vinhaça, e não geram resíduos extras, pois o lodo utilizado no reator como inóculo e a vinhaça remanescente do tratamento podem ser encaminhados para a própria cultura de cana e utilizados como fertilizante. Devido a estes inúmeros trabalhos voltados para o tema, melhores rendimentos são alcançados conforme verificado nos estudos abordados acima. Dentre eles, o escolhido como parâmetro para o cálculo da estimativa de produção de biogás, sendo o estudo de Bayu *et al* (2022).

4. Potencial de produção de biogás

Com o intuito de estimar qual seria o potencial de produção de biogás a partir da vinhaça da cana de açúcar no estado de São Paulo, é necessário conhecer qual a produção de etanol. Para cada litro de etanol produzido gera-se em torno de 12 a 20 L de vinhaça (BULLER *et al.*, 2021). Para dar seguimento com os cálculos, foi considerada a produção de 12 L de vinhaça para cada 1 L de etanol produzido.

Com base em dados divulgados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), levantou-se a quantidade de cana produzida no estado de São Paulo nas últimas 4 safras registradas, sendo elas: 2018/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.

De acordo com os estudos de MARINHO *et al.* (2014), o valor médio da DQO da vinhaça pode ser considerado de 19,3 g_{DQO}/L. Os resultados apresentados por Bayu *et al.* (2022), apresentaram rendimento de produção de metano de 0,392 L_{CH₄} / g DQO removida. Cerca de 69% da DQO foi removida no processo.

De acordo com EPE (2018), o biogás possui um poder calorífico de em torno de 4.500 kcal/m³ biogás, que equivale a 5,22 kWh/m³ biogás. Sendo assim, a partir do cálculo de quanto de metano é produzido e quanto biogás, considerando que 74,5 % do biogás é composto por metano (Bayu *et al.*, 2022), pode-se calcular a produção de biogás e seu potencial energético na sequência. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2, assim como o valor médio das safras, calculado devido às possíveis alterações sofridas ao longos dos anos influenciados pela pandemia do coronavírus. Os cálculos realizados e os resultados também estão apresentados no **ANEXO A – Valores calculados para a estimativa de potencial de produção de biogás a partir da vinhaça**.

Tabela 2: Valores obtidos para a estimativa de produção de biogás no estado de São Paulo.

Safra	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	Média
Cana de açúcar [kton]	332.880,6	342.614,3	354.288,4	298.514,2	332.074,4
Etanol [10 ³ L]	15.944.278,0	16.489.386,0	14.388.254,0	11.944.706,0	14.691.656,0
Vinhaça [10 ³ L]	191.331.336,0	197.872.632,0	172.659.048,0	143.336.472,0	176.299.872,0
Metano [10 ³ m ³ _{CH4}]	1.003.246,6	1.037.546,0	905.338,4	751.585,4	924.429,1
Biogás [10 ³ m ³ _{biogás}]	1.346.639,8	1.392.679,1	1.215.219,4	1.008.839,4	1.240.844,4
Potencial energético [GWh]	7.029,5	7.269,8	6.343,4	5.266,1	6.477,2

Fonte: (CONAB; BAYU *et al.*, 2022; MARINHO *et al.*, 2014; BULLER *et al.*, 2021; CIBiogás, 2022).

Portanto, a partir da média obtida das últimas 4 safras registradas no estado de São Paulo, pode-se concluir que seria possível produzir, aproximadamente, 1.240.844,4 mil m³biogás/ano, considerando que toda a vinhaça produzida seja tratada através de um reator CSTR com rendimento de aproximadamente 0,4 L_{CH4} / g _{DQO,remov.}. Isso tem potencial de gerar em torno de 6.477,2 GWh/ano de energia elétrica.

Considerando que o consumo nacional no Brasil no ano de 2021 foi de 497.503,0 GWh (EPE, 2022b), nota-se que a produção de energia elétrica a partir do biogás, produzido a partir de toda a vinhaça produzida de cana de açúcar anualmente do estado de São Paulo, geraria em torno de 1,3 % da energia consumida no Brasil em 2021.

5. Conclusão

Atualmente, existem 811 plantas de produção de biogás no Brasil, sendo que estas funcionam a partir de diferentes substratos, principalmente a partir de resíduos agropecuários, industriais e de saneamento básico. De acordo com o BiogasMap, levantado pela CIBiogás e outras instituições de pesquisa, a produção de biogás no ano de 2021 chegou a 2,82 bilhões m³/ano.

O estado de São Paulo apresenta um total de 60 plantas de produção de biogás em operação, sendo 46 delas destinadas para a produção de energia elétrica, correspondendo com a produção de 607,3 milhões de m³/ano de biogás (CIBiogás, 2022).

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2022, publicado pelo Ministério de Minas e Energia com o ano base em 2021, o estado de São Paulo gera um total de 57.659 GWh de energia, mas consome 133.274 GWh de energia. Ou seja, o estado não é autossuficiente, produzindo apenas 43 % da energia que necessita (EPE, 2022b). A partir da energia elétrica que pode ser produzida a partir do biogás de vinhaça, o estado geraria energia para auxiliar em seu consumo, diminuindo a dependência de fornecimento de energia de outros estados.

Sendo assim, é importante investir em outras fontes de energia, como a produção de biogás a partir de resíduos agrícolas, industriais e municipais. De acordo com os cálculos realizados para a estimativa de produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar, seria possível a produção de 6.477,2 GWh/ano de

energia elétrica a partir do biogás gerado, o que corresponde a aproximadamente 5,0 % do consumo registrado no estado de São Paulo no de 2021, que foi de 133.274 GWh (EPE, 2022b).

Além disso, a produção e posterior utilização do biogás, sendo como energia elétrica ou como biometano após a sua purificação para injeção em gasodutos e para utilização como combustível em veículos, diminuiria a emissão de gases de efeito estufa do estado, além de diminuir as emissões de gases de efeito estufa e outros gases tóxicos, como o próprio metano, que seria utilizado como principal fonte de combustão dentro do biogás.

Então, é possível concluir que a vinhaça possui um grande potencial como matéria-prima para a produção de combustíveis gasosos renováveis, principalmente o biogás.

6. Referências Bibliográficas

BARCELOS, Sheyla Thays Vieira *et al.* Startup of UASB reactor with limestone fixed bed operating in the thermophilic range using vinasse as substrate. **Renewable Energy: An International Journal**. Campo Grande, p. 610-616. 8 jul. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122010163?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2022.

BAYU, Ardian Indra *et al.* Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of sugarcane vinasse in a single-stage continuous stirred tank reactor. **Results In Engineering**, [S.L.], v. 14, p. 100432, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100432>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022001025?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2022.

BEBÉ, Felizarda V. *et al.* Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 781-787, dez. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662009000600017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9yssrwcKQRBs6x8VZCbLgPg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 ago. 2022.

BIODIESEL BRASIL. **Saiba as diferenças entre etanol anidro e etanol hidratado**. 2020. Disponível em: <https://biodieselbrasil.com.br/saiba-as-diferencas-entre-etanol-anidro-e-etanol-hidratado/>. Acesso em: 20 maio 2022.

BULLER, Luz Selene *et al.* A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 765, p. 142717, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142717>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972036246X>. Acesso em: 22 set. 2022.

CASTRO, Heizir F de. **Indústria Açucareira**. Lorena: Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, 2013. 19 p. Disponível em:

<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/Apostila1-Industriaacucareira2013.pdf>. Acesso em: 16 jul 2022.

CIBIOGÁS. **BiogásMap**. Disponível em:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NThhOGItOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRiYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3Zml3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>.

Acesso em: 19 nov. 2022.

CONAB. **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Boletim da safra de cana-de-açúcar: Quarto levantamento, abril 2020 – safra 2019/2020. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2020.

CONAB. **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Boletim da safra de cana-de-açúcar: Quarto levantamento, maio 2021 – safra 2020/2021. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2021.

CONAB. **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Boletim da safra de cana-de-açúcar: Quarto levantamento, abril 2022 – safra 2021/2022. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022.

CONAB. **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**. Boletim da safra de cana-de-açúcar: Segundo levantamento, agosto 2022 – safra 2022/2023. : Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2022.

DE SOUZA, Tamiris Alves; NOGUEIRA, Fernando José. Fontes Alternativas de energia no Brasil: Biomassa, Eólica e Solar. **Caderno de Estudos em**

Engenharia Elétrica, v. 4, n. 1, 2022. Disponível em:

<<http://seer.uniacademia.edu.br/index.php/eletrica/article/view/3252/2240>>.

Acesso em 02 out. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética - (org.). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis - Ano 2020**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. 87 p.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-615/NT-EPE-DPG-SDB-2021-03_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_ano_2020.pdf](#). Acesso em: 18 jul 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética - (org.). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022b. 6 p. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> >. Acesso em: 22 nov 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética - (org.). **Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. 26 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>. Acesso em: 22 nov 2022.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 02 out. 2022.

FELTRIN, Valdemar P. *et al.* Produção de *Lactobacillus plantarum* em melaço de cana-de-açúcar. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 119-124, 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-89132000000100015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/sw3bhRrf3GMbhNLGPRJvmCs/?lang=pt#:~:text=Lactobacillus%20plantarum%20%C3%A9%20um%20microrganismo,Mcfall%20%26%20Monteville%2C%201989>. Acesso em: 16 jul. 2022.

FERREIRA, Osania. Bagaço da palha de cana: saiba como reaproveitar. **Syngenta digital**. SP, 01 jun 2017. Disponível em: <https://blog.syngentadigital.ag/cana-de-acucar/>. Acesso em: 20 maio 2022.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. **Etanol**; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/etanol.htm>. Acesso em: 17 jun 2022.

GALLARDO, Jéssica Carolina Medina. Produção de etanol a 40-42°C em uma co-cultura de *Saccharomyces cerevisiae* e *Issatchenkia orientalis*. 2010. 116 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química de Araraquara, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88054>>. Acesso em: 16 jul 2022.

GEBARA, Dib. **Desempenho de um reator aeróbio de leite fluidizado no tratamento de esgoto sanitário**. 2006. 400 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-22072007-161214/publico/DoutoradoGebara2006.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2022.

HIDRO-ETE. **Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA ou UASB)**. Disponível em: <http://www.hidroete.com.br/destaque-1-principal/>. Acesso em: 03 out. 2022.

JÚNIOR, Agenor B. de Almeida *et al.* Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 1004-1013, out. 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662011001000003>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/sgZNSQtFvRSx587NstrLGQh/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 15 jul. 2022. ALMEIDA, Manoel de. **Vinhaça - Principais técnicas de utilização**. 2015. Disponível em: <https://www.piracicabaengenharia.com.br/vinhaca-principais-tecnicas-de-utilizacao/>. Acesso em: 23 maio 2022.

KARLSSON, Tommy *et al.* Manual Básico de Biogás. Lajeado: Univates, 2014. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

KUNZ, Airton *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbio, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LIMA, Heleno Quevedo de *et al.* **Independência Energética com Biogás:** caminho para transição energética e economia de baixo carbono. [S.L.]: Chp Brasil, 2022. 62 slides, color.

LIMA, Heleno Quevedo de. **Biodigestor - Modelos e configurações:** tecnologias para produção de biogás: conceitos, classificações e modelos.. Tecnologias para produção de biogás: conceitos, classificações e modelos.. 2021. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/biodigestor-modelos-e-configuracoes>. Acesso em: 03 out. 2022.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-8KYNF3>. Acesso em: 03 out. 2022.

MACHADO, Simone Silva. **Tecnologia da fabricação do açúcar.** Inhumas: Rede E-Tec Brasil, 2012. 56 p. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/11_tecnologia_fabricacao_acucar.pdf. Acesso em: 14 jun. 2022.

MADALENO, Leonardo Lucas. **Cigarrinha-das-raízes na cana-de-açúcar e qualidade do açúcar produzido.** 2010. ix, 80 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/105268>>. Acesso em 14 jun 2022.

MARINHO, Júlia Fernanda Urbano *et al.* Sugar cane vinasse in water bodies: Impact assessed by liver histopathology in tilapia. **Elsevier.** Rio Claro, p. 239-245. 26 set. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651314004278>. Acesso em: 12 set. 2022.

MEDINA, Juliana. **Cana-de-açúcar: a Cultura que Potencializou o Brasil!** Disponível em: <https://agropos.com.br/cana-de-acucar/>. Acesso em: 23 maio 2022.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Produção Brasileira de Açúcar**. Brasília, 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/003PRODUODEACARNOBRASILPORSAFRA_13062022.pdf. Acesso em: 16 jul 2022.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Produção Brasileira de Etanol**. Brasília, 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/004PRODUOBRASILEIRADEETANOL_13062022.pdf. Acesso em: 16 jul 2022.

MK2R (Minas Gerais). **Usina Santo Ângelo inicia processo de compostagem de seus resíduos industriais**. 2015. Disponível em: <http://mk2r.com.br/2016/05/09/usina-santo-angelo-inicia-processo-de-compostagem-de-seus-residuos-industriais/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

NACHILUK, K. Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 16, n. 6, jun. 2021, p. 1-5. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925>. Acesso em: 18 jul 2022.

NERY, Valéria del *et al.* Hydraulic and organic rates applied to pilot scale UASB reactor for sugar cane vinasse degradation and biogas generation. **Biomass & Bioenergy**. São Carlos, p. 411-417. 12 out. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341830268X?via%3Dihub>>. Acesso em: 16 out. 2022.

NOVACANA. **Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana/uso-vinhaca-cultura>. Acesso em: 23 maio 2022.

OLIVEIRA, Felipe de Carvalho. Vinhaça: perspectiva de reuso. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 10., 2018, São Cristóvão. **Anais [...]**. São Cristóvão: Ri/Ufs, 2018. p. 596-603. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10381/2/VinhacaPerspectivaReuso.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

OLIVEIRA, Matheus Ribeiro Barbosa *et al.* PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE MELAÇO DE CANA. **Revista de Estudos Ambientais**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 38, 10 out. 2019. Fundacao Universidade Regional de Blumenau. <http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2019v21n1p38-45>. Disponível em: <https://bu.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/7472/4347>. Acesso em: 16 jul. 2022.

OLIVEIRA, Mauro Wagner de *et al.* Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**. Cana-de-açúcar, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348885212_Nutricao_mineral_e_adubacao_da_cana-de-acucar. Acesso em: 20 maio 2022.

OLIVEIRA, Talita. **Evolução da matriz energética brasileira em comparação com outros países**. 2022. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16155/TG_TALITA_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 set. 2022.

Panorama do Biogás no Brasil 2021. CIBiogás (Brasil) Relatório Técnico nº 001/2022 – Foz do Iguaçu, CIBiogás, 2022. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/download-panorama-do-biogas-no-brasil-2021>. Acesso em: 20 nov 2022.

RAMOS, Lucas Rodrigues *et al.* Anaerobic digestion of vinasse in fluidized bed reactors: process robustness between two-stage thermophilic-thermophilic and thermophilic-mesophilic systems. **Journal Of Cleaner Production**, São Carlos, v. 314, p. 128066, set. 2021. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128066>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621022848?via%3Dihub>>. Acesso em: 29 out. 2022.

RAMOS, Lucas Rodrigues *et al.* Scale-up and energy estimations of single- and two-stage vinasse anaerobic digestion systems for hydrogen and methane production. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 349, p. 131459, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131459>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622010812?via%3Dihub>. Acesso em: 03 out. 2022.

REIS, Cristiane Marques dos *et al.* Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane vinasse in an anaerobic fluidized bed reactor. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 40, n. 27, p. 8498-8509, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.136>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915010745?via%3Dihub>. Acesso em: 29 out. 2022.

ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da; GARCIA, Jorge Luiz Faria. O etanol de segunda geração: limites e oportunidades. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n.32 , p. 117-156, dez. 2009. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/10017/1/RB%2032%20O%20etanol%20de%20segunda%20gera%c3%a7%c3%a3o%20limites%20e%20oportunidades%20P%20BD.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.

SANTANA, Ana Lucia. **Cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/plantas/cana-de-acucar/>. Acesso em: 20 maio 2022.

SESI (Sp). **Tipos de açúcar**. 2021. Disponível em:
<https://alimentesebem.sesisp.org.br/arquivos/noticia/tipos-de-acucar>. Acesso em:
20 maio 2022.

SILVA, Mellissa A. S. da *et al.* Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 108-114, fev. 2007b FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662007000100014>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/vxTJ6yw3YP7bsCx7qC3Qcdj/citation/?lang=pt>.
Acesso em: 23 maio 2022.

SILVA, V. L. M. M. *et al.* Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 27-32, 23 abr. 2007a.
Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/28/64>. Acesso em: 15 ago. 2022.

TADINI, Giovanna Wolf. **Novo projeto é criado para reutilização da vinhaça**. 2016. Disponível em:
<http://www.usp.br/aunantigo/exibir?id=7563&ed=1313&f=2#:~:text=A%20pesquisadora%20da%20Escola%20Polit%C3%A9cnica,produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20%C3%A1lcool%20fosse%20favorecida>. Acesso em: 23 maio 2022.

TORRES, Luísa. Panorama completo da Cana-de-açúcar. **Syngenta digital**. SP, 25 jul 2021. Disponível em: <https://blog.syngentadigital.ag/cana-de-acucar/>.
Acesso em: 20 maio 2022.

UDOP. **Sustentabilidade do cultivo de cana-de-açúcar para produção de bioenergia**. 2021. Disponível em:
<https://udop.com.br/noticia/2021/2/19/sustentabilidade-do-cultivo-de-cana-de-acucar-para-producao-de-bioenergia.html>. Acesso em: 20 maio 2022.

VILELA, Frederico Sampaio Vasconcelos. **Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar**: estudo de caso - usina jalles machado s/a. 2013. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Mecânicas,

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Disponível em:

https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13361/1/2013_FredericoSampaioVasconcelosVilela.pdf. Acesso em: 13 jun. 2022.

ANEXO A – Valores calculados para a estimativa de potencial de produção de biogás a partir da vinhaça

Safra	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	Média
PRODUÇÃO de cana (kton)	332.880,6	342.614,3	354.288,4	298.514,2	332.074,4
ATR para etanol (%)	58,9%	59,4%	47,4%	47,8%	53,4%
ATR - Cana para etanol (kton)	196.005,4	203.502,8	168.048,7	142.774,0	177.582,7
Etanol total (mil L)	15.944.278,0	16.489.386,0	14.388.254,0	11.944.706,0	14.691.656,0
Vinhaça (mil L)	191.331.336,0	197.872.632,0	172.659.048,0	143.336.472,0	176.299.872,0
Metano (mil L CH4)	1.003.246.647,1	1.037.545.959,5	905.338.428,2	751.585.380,3	924.429.103,8
Metano (mil m³ CH4)	1.003.246,6	1.037.546,0	905.338,4	751.585,4	924.429,1
Biogás (mil m³)	1.346.639,8	1.392.679,1	1.215.219,4	1.008.839,4	1.240.844,4
Potencial de energia (kWh)	7.029.459.728,5	7.269.785.112,5	6.343.445.094,0	5.266.141.859,5	6.477.207.948,6
Potencial de energia (GWh)	7.029,5	7.269,8	6.343,4	5.266,1	6.477,2
Geração de SP (GWh)	57.659,0	57.659,0	57.659,0	57.659,0	57.659,0
% com relação a geração	12,2%	12,6%	11,0%	9,1%	11,2%
Consumo de SP (Gwh)	133.274,0	133.274,0	133.274,0	133.274,0	133.274,0
% com relação a consumo	5,3%	5,5%	4,8%	4,0%	4,9%

Parâmetros utilizados

Vinhaça	19,3	g DQO/L
Remoção de DQO	0,7	%
Rendimento reator	0,4	L CH4/g DQO remov
Dqo remov	13,4	g DQO/L. dia
Rendimento vinhaça	5,2	L CH4/Lvin.dia
Fator de conversão de biogás para eletricidade (EPE)	4500	kcal/m³ biogás
	5,22	kWh/m³ biogás