



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO
DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA VINHAÇA BIODIGERIDA E NÃO BIODIGERIDA DENTRO
DE UMA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**KENNY YUSIMY GARCIA ANGARITA
MIGUEL CAPUTO**

Foz do Iguaçu-PR

2022

KENNY YUSIMY GARCIA ANGARITA

MIGUEL CAPUTO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA VINHAÇA BIODIGERIDA E NÃO BIODIGERIDA
DENTRO DE UMA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Química da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química sob orientação da Prof.^a Dra. Andréia Cristina Furtado e co-orientação da Prof. Dr. Felipe Furlan

Foz do Iguaçu – PR

2022

KENNY YUSIMY GARCIA ANGARITA

MIGUEL CAPUTO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA VINHAÇA BIODIGERIDA E NÃO BIODIGERIDA
DENTRO DE UMA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Química da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof.^a Dra. Andréia Cristina Furtado
UNILA

Co-orientador: Prof. Dr. Felipe Furlan
UFSCar

Dr. Andrew Milli Elias
Embrapa

Foz do Iguaçu, Dezembro de 2022.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Kenny Yusimy Garcia Angarita e Miguel Caputo

Curso: Bacharelado em Engenharia Química.

| | Tipo de Documento |
|------------------------|-------------------------------------|
| (X) Graduação | (.....) Artigo |
| (.....) Especialização | (X) Trabalho de conclusão de curso |
| (.....) Mestrado | (.....) Monografia |
| (.....) Doutorado | (.....) Dissertação |
| | (.....) Tese |
| | (.....) CD/DVD – obras audiovisuais |

Título do Trabalho Acadêmico: Estudo da utilização da vinhaça biodigerida dentro de uma indústria sucroalcooleira.

Nome da Orientadora: Prof.^a Dra. Andréia Cristina Furtado

Nome da Co-Orientador: Prof. Dr. Felipe Furlan

Data da Defesa: 19/12/2022

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, Dezembro de 2022.

Kenny Y. G. Angarita Miguel Caputo

Assinatura do responsável

¿Qué sería la vida si no tuviéramos el valor de intentar cosas nuevas?

Vincent Van Gogh

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaríamos de agradecer a Deus por nos permitir completar esta etapa.

A nossa querida Universidade Federal de Integração Latino-americana (UNILA) por nos dar a oportunidade de entrar no ensino superior e permitir viver a verdadeira integração latino-americana.

Agradecimentos especiais a Profa. Dra. Andreia Furtado e ao Prof. Dr. Felipe Furlan, por toda a orientação fornecida para o desenvolvimento deste trabalho, por sua disponibilidade e abertura à discussão sempre que necessário. Ao Prof. Andrew por ter aceitado o convite e por toda a ajuda dada.

Ao grupo de estudos da UFSCar, especialmente aos membros Christian, e Henrique por todo seu apoio e sugestões.

A todos os professores do curso de Engenharia Química que contribuíram direta ou indiretamente para nossa formação profissional e pessoal.

Eu, Kenny, agradeço à minha mãe Flor e ao meu pai Heber que me protege desde o céu, aos meus irmãos Junior e Yeberson por serem sempre o meu maior apoio e por acreditarem em mim em cada decisão que tomei ao longo do meu caminho. À Dory minha filhinha cachorrinha por todo o amor incondicional e companheirismo que me foi dado, onde apesar de um dia difícil ela estava sempre ao meu lado e trazia um sorriso no meu rosto. Aos meus avós Nelly e Pedro, às minhas tias, tios e primos por todo o amor que me deram e por sempre me encorajarem a seguir em frente. A Miguel pela grande amizade e parceria durante toda a graduação a qual permitiu que juntos executássemos este trabalho. Aos meus amigos Kenneth, Hugo, Lina, Daniel E, Leticia, Adrian, Noelia, Karen, Juliana e Gabriela que se tornaram minha família durante esta jornada e trouxeram muita alegria e apoio em momentos difíceis. Ao meu parceiro de vida, Arthur, por todo o apoio e companheirismo mostrado durante este período. A Adalberto por todas as lições e ensinamentos. Finalmente, a toda minha família, amigos e professores que me encorajaram a chegar até aqui e realizar este sonho amado, muito obrigado a todos vocês!

Eu, Miguel, agradeço aos meus pais, Daniela e Emerson por todo amor, carinho, apoio, ajuda e motivação fornecida durante todos estes anos. A minha avó, Floris, que me criou desde pequeno e agora está tendo a oportunidade de ver eu concluir mais esta etapa de vida. A minha cachorrinha Mel, que é quase uma pessoinha, por todo amor incondicional e mordidas. A Kenny, meu irmão colombiano que a UNILA me trouxe,

amizade que durou e permanece por todos estes anos, possibilitando que juntos superássemos os desafios à frente. Aos meus amigos Eduardo, Leticia Lisik, Leticia Vivian, Hugo, Willian, Gabriela, Adrian, Luis Guilherme e Daniel que fizeram a diferença na minha vida e tornaram cada momento muito melhor. A minha namorada Geovana por todo suporte fornecido, tanto emocional quanto físico, tornando os processos mais leves. Aos professores(as) Kátya, Leonardo e Marlei, por todo conhecimento transferido, tem minha total admiração. E finalmente a todos meus familiares e colegas que passaram em minha vida durante esta jornada. Vocês foram incríveis e vou levar um pedacinho de cada um comigo. Muito Obrigado!

RESUMO

A vinhaça é gerada pela produção de etanol na etapa de destilação do álcool. Esse subproduto é composto por vários elementos importantes para o desenvolvimento vegetal, podendo ser utilizado no processo de fertirrigação e para a produção de biocombustíveis. A digestão anaeróbica (DA) de efluentes (vinhaça) nas biorrefinarias de cana-de-açúcar pode melhorar o balanço energético no processo de produção de bioetanol e a harmonização ambiental do descarte de resíduos. Este estudo visa simular e analisar a viabilidade econômica e ambiental da inclusão do processo de DA da vinhaça em uma biorefinaria de produção de etanol 1G com co-geração para produção de biogás, CBIOS e geração de energia, onde a unidade simulada tem uma capacidade de moagem anual de 4,0 milhões de toneladas (833 toneladas/h), com o auxílio da ferramenta RenovaCalc utilizada pela RenovaBio e do software EMSO. De acordo com o cenário estudado, observou-se um aumento de 4,71% na geração de energia em relação à simulação sem DA. Através da RenovaCalc obteve-se a nota de eficiência energética e quantidade de CBIOS gerada, dessa maneira, verificou-se que para o caso com a DA da vinhaça ocorreu um aumento na produção de CBIOS, de aproximadamente 0,55 ton/h. Em relação a viabilidade econômica, os casos abordados (com e sem DA) apresentam $VPL > 0$, o que significa que ambos os casos de estudo representam um investimento favorável. O processo com DA obteve um VPL de US\$ 190.878 milhões e, sem DA possui um VPL igual a US\$ 207.651 milhões. Em relação à análise de sensibilidade aplicada, constatou-se uma diminuição na VPL para cada vez que o preço de venda do CBIOS e da eletricidade foram aumentados para o caso sem DA. No caso da unidade com DA, foi observado que quando o preço do CBIOS excede 958,64 UDS/ton, há um VPL maior em comparação com a unidade sem DA. O mesmo fato ocorre quando o preço de venda de eletricidade está acima de 117,94 USD/MWh. Portanto, a análise sem DA resulta em um investimento com maior vantagem econômica em relação ao processo com DA, pois para o segundo, é necessário que o CBIOS ou a eletricidade excedam os valores de venda encontrados.

Palavras-chave: Biogás, Digestão Anaeróbica, RenovaBio, RenovaCalc, Vinhaça.

ABSTRACT

Vinasse is generated by ethanol production in the alcohol distillation step. This by-product is composed of several elements important for plant development and can be used in the process of fertigation and for the production of biofuels. The anaerobic digestion (AD) of effluents (vinasse) in sugarcane biorefineries can improve the energy balance in the bioethanol production process and the environmental harmonization of waste disposal. With the help of the RenovaCalc tool used by the RenovaBio and EMSO software, this study aims to simulate and analyze the economic and environmental feasibility of including the stillage DA process in a 1G ethanol production biorefinery with cogeneration for biogas and CBIOS production and power generation. The unit has an annual milling capacity of 4.0 million tons (833 tons/h). According to the scenario studied, an increase of 4.71% in energy generation was observed compared to the simulation without DA. Through RenovaCalc the energy efficiency score and quantity of CBIOS generated was obtained, thus, it was observed that for the case with the DA of vinasse there was an increase in the production of CBIOS, about 0.55 ton/h. In relation to the economic viability, the cases approached (with and without DA) present NPV > 0, which means that both cases of study represent a favorable investment. The NPV of the case with DA is US\$ 190.878 million, while the NPV of the case without DA is US\$ 207.651 million. Regarding the sensitivity analysis applied, a decrease in NPV was found each time the selling price of CBIOS and electricity was increased for the case without DA. In the case of the unit with DA, it was observed that when the price of CBIOS exceeded 958.64 UDS/t, there was a higher NPV compared to the unit without DA. The same case applies when the electricity sales price is above 117.94 USD/MWh. Therefore, the analysis without DA results in an investment with a greater economic advantage compared to the process with DA, because for the latter, it is necessary that the CBIOS or electricity exceed the sales values found.

Key words: Anaerobic digestion, Biogas, RenovaBio, RenovaCalc, Vinasse.

RESUMEN

La vinaza se genera en la producción de etanol durante la etapa de destilación del alcohol. Este subproducto se compone de varios elementos importantes para el desarrollo de las plantas y puede utilizarse en el proceso de fertiirrigación y para la producción de biocombustibles. La digestión anaerobia (DA) de efluentes (vinaza) en biorrefinerías de caña de azúcar puede mejorar el balance energético en el proceso de producción de bioetanol y la armonización medioambiental mediante la eliminación de residuos. Con la ayuda de la herramienta RenovaCalc utilizada por la Renovabio y del software EMSO, este estudio tiene como objetivo simular y analizar la viabilidad económica y ambiental de incluir el proceso de DA de la vinaza en una biorrefinería de producción de etanol 1G con cogeneración para la producción de biogás y generación de CBIOS y energía, la unidad cuenta con una capacidad de molienda anual de 4,0 millones ton (833 ton/h). Según el escenario estudiado, se verificó un aumento del 4,71% en la generación de energía en comparación con la simulación sin DA. A través del RenovaCalc fue obtenida la nota de eficiencia energética y cantidad de CBIOS generada, así, fue observado que para el caso con el DA de vinaza hubo un aumento en la producción de CBIOS, cerca de 0,55 ton/h. En relación a la viabilidad económica, los casos abordados (con y sin DA) presentan $VPL > 0$, lo que significa que ambos casos de estudio representan una inversión favorable, el proceso con DA tiene un VPL de US\$ 190,878 millones y, sin DA tiene un VPL igual a US\$ 207,651 millones, esto se debe a que el caso de DA tiene mayores costos en la parte de manutención y equipos utilizados lo que lleva a un VPL menor comparado con el caso sin DA. Según el análisis de sensibilidad aplicado, se observó una disminución del VPL para cada vez que se aumentaba el precio de venta de CBIOS y electricidad para el caso sin DA. En el caso de la unidad con DA, se observó que cuando el precio del CBIOS supera los 958,64 UDS/t existe un VPL superior en comparación con la unidad sin DA. Este mismo caso se aplica cuando el precio de venta de la electricidad es superior a 117,94 USD/MWh. Por lo tanto, el análisis sin DA como resultado una inversión con mayor ventaja económica en comparación con el proceso con DA, ya que para este último es necesario que el CBIOS o la electricidad superen los valores de venta encontrados.

Palabras clave: Biogás, Digestión anaeróbica, RenovaBio, RenovaCalc.

LISTA DE ABREVIACÕES

| | |
|-----------|---|
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| CAPEX | Capital Expenditure |
| CBIOS | Créditos de Descarbonização |
| CNPE | Conselho Nacional de Política Energética |
| DA | Digestão anaeróbia |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| EMSO | Environment Modeling Simulation and Optimization |
| GEE | Gases Efeito Estufa |
| IBICT | Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| OPEX | Operating Expenses |
| PNPB | Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel |
| Proalcool | Programa Nacional do Alcool |
| RenovaBio | Política Nacional de Biocombustíveis |
| TC | Toneladas de cana-de-açúcar |
| VPL | Valor Presente Líquido |
| 1G | Etanol de primeira geração |
| 1G2G | Etanol de primeira e segunda geração |
| 2G | Etanol de segunda geração |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Biorrefinaria, entradas e saídas do processo..... | 22 |
| Figura 2. Processo simplificado de produção de etanol de primeira geração. | 26 |
| Figura 3. Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. | 31 |
| Figura 4. Esquema de funcionamento da RenovaBio. | 35 |
| Figura 5. Fluxograma da biorrefinaria implementada no simulador EMSO. | 43 |
| Figura 6. Produtividade agrícola média do Estado de São Paulo por safras. | 48 |
| Figura 7. Cálculo da intensidade de carbono, nota de eficiência e CBIO no EMSO. | 51 |
| Figura 8. Utilização da regra dos seis décimos para <i>scale up</i> dos equipamentos. | 53 |
| Figura 9. Principais resultados obtidos em simulações com e sem DA e comparados com o trabalho de Longati <i>et al</i> 2019. | 55 |
| Figura 10(A). Resultados para a análise de sensibilidade: Valor Presente Líquido (VPL) em função da variação do preço de venda de CBIOS. | 60 |
| Figura 10(B). Comparação dos VPLs obtidos em função da variação do preço de venda de CBIOS. | 60 |
| Figura 11(A). Resultados para a análise de sensibilidade: Valor Presente Líquido (VPL) em função da variação do preço de venda de eletricidade. | 61 |
| Figura 11(B). Comparação dos VPLs obtidos em função da variação do preço de venda de eletricidade. | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Características físico-químicas da vinhaça <i>in natura</i> de cana de açúcar..... | 28 |
| Tabela 2. Características físico-químicos da vinhaça <i>in natura</i> de cana-de-açúcar submetidos a biodigestão. | 29 |
| Tabela 3. Composição do biogás derivado da vinhaça. | 30 |
| Tabela 4. Composição da cana-de-açúcar. | 44 |
| Tabela 5. Componentes usados na simulação da biorrefinaria. | 44 |
| Tabela 6. Principais parâmetros de entradas adotados nas simulações. | 46 |
| Tabela 7. Principais parâmetros de etapas adotados nas simulações. | 46 |
| Tabela 8. Parâmetros utilizados para a fase agrícola. | 49 |
| Tabela 9. Principais resultados obtidos nas simulações da biorrefinaria, incluindo a biodigestão da vinhaça. | 54 |
| Tabela 10. Resultados dos CBIOS produzidos do estudo de caso de base. | 56 |
| Tabela 11. Resultados do investimento industrial dos equipamentos para o estudo de caso de base. | 57 |
| Tabela 12. Resultados do custo operacional para o estudo de caso de base. | 58 |
| Tabela 13. Resultados do investimento total para o estudo de caso de base. | 58 |
| Tabela 14. Resultados do valor presente líquido para o estudo de caso de base. | 59 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2. OBJETIVOS..... | 19 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 19 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 19 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 20 |
| 3.1 CANA DE AÇÚCAR..... | 20 |
| 3.2 BIORREFINARIAS..... | 21 |
| 3.2.1 Etanol 1G..... | 22 |
| 3.2.2 Vinhaça..... | 26 |
| 3.2.3 Caracterização da vinhaça <i>in natura</i> e biodigerida..... | 28 |
| 3.3 BIOGÁS E BIODIGESTÃO ANAERÓBIA..... | 30 |
| 3.3.1 Hidrólise..... | 31 |
| 3.3.2 Acidogênese..... | 31 |
| 3.3.3 Acetogênese..... | 32 |
| 3.3.4 Metanogênese..... | 32 |
| 3.4 RENOVABIO..... | 33 |
| 3.4.1 Créditos de Descarbonização (CBIOS)..... | 35 |
| 3.4.2 RenovaCalc..... | 36 |
| 3.4.3 A Certificação..... | 38 |
| 3.5 VIABILIDADE ECONÔMICA..... | 38 |
| 3.5.1 <i>Operating Expenses</i> (OPEX)..... | 39 |
| 3.5.2 <i>Capital Expenditure</i> (CAPEX)..... | 39 |
| 3.5.3 Valor Presente Líquido (VPL)..... | 40 |
| 4. METODOLOGIA..... | 41 |
| 4.1 SIMULADOR DE PROCESSOS..... | 41 |
| 4.2 DESCRIÇÃO DA BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR..... | 41 |
| 4.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA | 45 |
| 4.4 RENOVACALC..... | 47 |
| 4.5 ANÁLISE DE CUSTO..... | 51 |
| 4.5.1 Cálculo do OPEX..... | 52 |
| 4.5.2 Cálculo do CAPEX..... | 52 |
| 4.5.3 Utilização da Regra dos Seis Décimos..... | 52 |
| 4.5.4 Cálculo do VPL..... | 53 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 54 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| 5.1 ANÁLISE DE CBIOS..... | 56 |
| 5.2 ANÁLISE ECONÔMICA..... | 57 |
| 6. CONCLUSÃO..... | 63 |
| REFERÊNCIAS..... | 64 |

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás são os maiores produtores de etanol de cana-de-açúcar, representando 92% da produção total do país em 2020/2021 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2021). De acordo com a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA, 2021) a safra brasileira deste mesmo ano conseguiu atingir 651 milhões de toneladas das quais foram produzidos 32,5 milhões de m³ de etanol.

Os principais resíduos industriais gerados pela produção de etanol são: bagaço de cana, torta de filtro, palhas de cana e vinhaça. O bagaço de cana é utilizado principalmente como combustível para as caldeiras gerando vapor e energia elétrica, a torta de filtro pode ser utilizada como adubo ou também ração animal, a palha de cana que fica no campo serve como cobertura vegetal para proteger o solo e ajuda na manutenção da qualidade e da umidade do solo e a vinhaça é utilizada principalmente na fertirrigação das plantações próximas às usinas (AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS, 2017).

Segundo Cortes Rodriguez *et al* (2018), a vinhaça é o subproduto líquido da produção de etanol de cana-de-açúcar. Em média, são produzidos de 10 a 15 L de vinhaça para cada litro de etanol produzido. Este subproduto é geralmente utilizado como fertilizante nas culturas de cana-de-açúcar devido a presença de macronutrientes na sua composição, tais como o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), e matéria orgânica.

Uma alternativa para a vinhaça de cana de açúcar é a biodigestão em reatores anaeróbios (DA), reduzindo a sua carga orgânica e neutralizando o seu pH, mantendo ao mesmo tempo a maioria dos seus nutrientes para uso agrícola (MORAES *et al.*, 2014).

De acordo com Moraes *et al.* (2014), do LNBR, “Se toda a vinhaça do Brasil fosse biodigerida, o potencial de geração de energia elétrica no país seria equivalente a 7,5% da capacidade da hidrelétrica de Itaipu”.

Em 2017, para encorajar a inserção de biocombustíveis na matriz de transportes brasileira, foi implementada a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei 13.576/2017 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2017) buscando atender aos compromissos que o Brasil assumiu na 21ª Conferência das Partes - COP215 e das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em Paris-França estabelecendo a meta de reduzir a emissão de carbono em no mínimo 43% até 2030 em comparação às emissões de 2005 (MME, 2017a).

A RenovaBio tem como estratégia promover a expansão dos biocombustíveis para um padrão mais sustentável, através de um tratamento de mercado diferenciado para aqueles com menores emissões de Gases Efeito Estufa (GEE) no seu ciclo de vida (MATSUURA *et al.*, 2018). O programa utiliza uma referência metodológica baseada em parâmetros internacionais e uma ferramenta para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis denominada RenovaCalc, a partir de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de toda a cadeia de produção de biocombustíveis.

Segundo Quevedo de Lima (2022), a principal ferramenta do RenovaBio é estabelecer metas nacionais anuais de descarbonização do setor de combustíveis fósseis com o fim de aumentar a produção de biocombustíveis, promovendo assim, uma maior participação na matriz energética de transportes do país. A certificação da produção de biocombustíveis dá a cada produtor e importador de biocombustível uma pontuação diferente, inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido, onde está pontuação reflete com precisão a contribuição de cada produtor para reduzir as emissões de GEEs em uma determinada quantidade (toneladas de CO₂ equivalente) em comparação com alternativas fósseis.

Desta forma, as distribuidoras devem comprovar o cumprimento de metas individuais obrigatórias através da obtenção de créditos de descarbonização (CBIOS). Este crédito é um ativo financeiro negociado em bolsa que é derivado da certificação dos processos de produção de biocombustíveis, tendo como base seus respectivos níveis de eficiência em relação às suas emissões (QUEVEDO DE LIMA, 2022).

O crédito de descarbonização (CBIO) representa uma tonelada de CO₂ que deixa de ser emitida pela substituição do combustível fóssil por um biocombustível. É um título emitido por um produtor de biocombustível e é comercializado para distribuidores de combustíveis, dentro de regras estabelecidas no âmbito do Programa RenovaBio, administrado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) (QUEVEDO DE LIMA, 2022).

De acordo com Quevedo de Lima (2022), uma vez tendo elegibilidade para emitir CBIOS, o produtor deve preencher a calculadora específica do programa RenovaBio (chamada RenovaCalc), onde o produtor deve manter rastreabilidade documental a respeito de cada célula preenchida, de forma a apresentar à firma inspetora. O mesmo deve contratar a firma inspetora, submeter-se à auditoria e certificar sua nota de eficiência (pegada de carbono). Assim, a cada nota fiscal de venda de biocombustível, poderá ser emitida uma determinada quantidade de CBIO.

Desta maneira, surge um benefício financeiro, ou seja, as distribuidoras possuem obrigação legal de compra de CBIOS para estarem em conformidade com as metas gerenciadas pela ANP / Ministério de Minas e Energia (MME), onde atualmente cada CBIO é comercializado numa faixa entre R\$ 40 a R\$ 80 (QUEVEDO DE LIMA, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo visa avaliar o potencial técnico-econômico da biodigestão da vinhaça para produção de energia elétrica e térmica no contexto do programa RenovaBio. A avaliação incluirá o cálculo dos custos de investimento e operacionais da inclusão da etapa de biodigestão e adaptação do sistema de cogeração. Além disso, o impacto ambiental deverá ser avaliado empregando a ferramenta RenovaCalc para determinar o número de CBIOS gerados e sua contribuição econômica correspondente.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar de acordo com a visão do setor sucroalcooleiro, a viabilidade tecnológica e econômica da geração de biogás, a partir da vinhaça da cana-de-açúcar, dentro do contexto da RenovaBio e produção de CBIOS (Créditos de Descarbonização).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular uma destilaria autônoma com e sem a biodigestão da vinhaça para produção de biogás.
- Realizar a análise de ciclo de vida, empregando a metodologia descrita pelo programa RenovaBio para calcular a nota de eficiência energética e os CBIOS gerados pelas duas plantas.
- Realizar a análise econômica das duas destilarias, comparando seus desempenhos.
- Identificar o ponto de equilíbrio econômico para um projeto de produção de biogás, com relação aos preços dos CBIOS;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CANA DE AÇÚCAR

A teoria mais aceita da origem de açúcar é que seja nativa das ilhas do Arquipélago da Polinésia, posteriormente se espalhando para os demais países. Os árabes foram os responsáveis da propagação do cultivo no norte da África e sul da Europa, por todo o Mar Mediterrâneo. As caravelas, antes de iniciarem suas viagens, levavam mudas de cana-de-açúcar junto com seus suprimentos para serem plantadas em novas terras e servirem de suprimentos às novas expedições, sendo este o modo como a cana de açúcar foi introduzida nas Américas através da segunda expedição de Cristóvão Colombo, em 1493 e, no Brasil em 1502 (SILVA *et al.*, 2016) e (CESNIK 2007).

A partir das primeiras mudas de cana de açúcar, Martim Afonso de Souza, em 1533, fundou o primeiro engenho de açúcar para a produção de açúcar sob o nome de São Jorge dos Erasmus, na Capitania de São Vicente. Depois disso, pequenas plantações foram estabelecidas ao longo do litoral brasileiro e se expandiram para outros estados como Rio de Janeiro, Bahia, Espírito Santo, Alagoas e Pernambuco (SILVA *et al.*, 2016).

No final do século XVI, o Brasil já era reconhecido como o principal produtor e fornecedor mundial de açúcar. Com um artigo de melhor qualidade do que o proveniente da Índia e uma produção anual estimada em 6.000 toneladas, das quais cerca de 90% foram exportadas para Portugal e distribuídas na Europa (FERNANDES, 2020).

Praticamente tudo pode ser aproveitado da cana-de-açúcar, pois os subprodutos e resíduos podem ser utilizados na alimentação humana e animal, na produção de energia e na fertilização do solo. Entre os subprodutos e resíduos destacam-se: bagaço, melaço (ou mel final), torta de filtro, vinhaça, óleo fusil, álcool bruto, fermento seco (FERNANDES, 2020) e (SILVA *et al.*, 2016).

Conforme expôs Longati (2018), a cana-de-açúcar é composta por 1/3 de caldo e 2/3 de biomassa (bagaço, palha e ponteiro). A partir do caldo, os processos industriais já existentes produzem açúcar e etanol.

Embora os processos industriais já empreguem a biomassa de cana-de-açúcar como insumo energético para atender as demandas por utilidades quentes do processo, esse material ainda representa um potencial energético. Isto porque a partir desta biomassa é possível produzir energia na forma de energia elétrica e/ou etanol 2G. Desta forma, tornou-se interessante o aumento da eficiência energética das usinas, visando

diminuir a demanda de utilidades e disponibilizando, assim, mais material lignocelulósico (LONGATI, 2018).

De acordo com Ribeiro (2016), o bagaço é composto principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. As propriedades físicas, químicas e biológicas dos materiais lignocelulósicos dependem da composição química desses materiais e da organização e interações entre seus constituintes.

3.2 BIORREFINARIAS

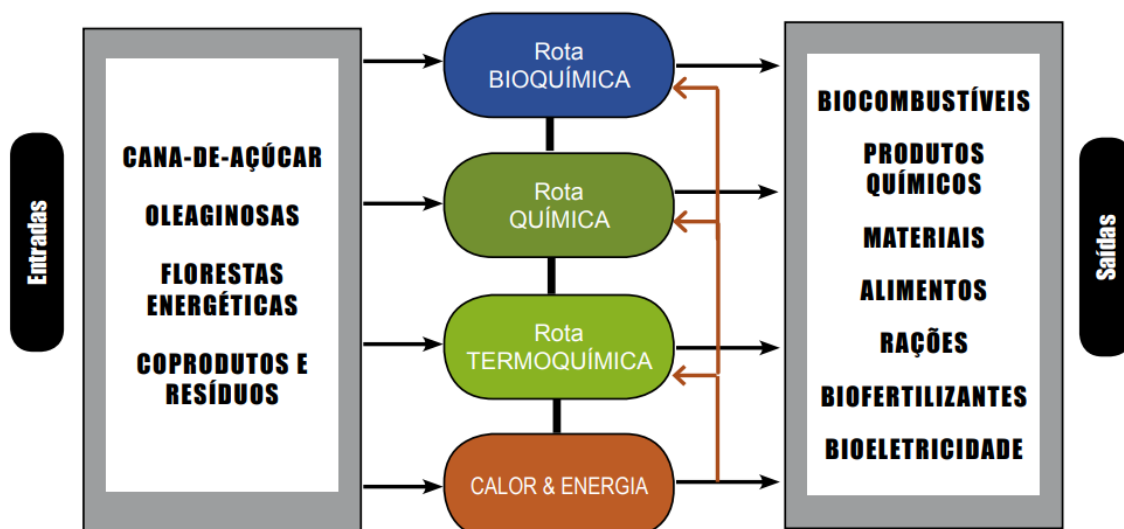
De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2021), uma biorrefinaria é uma instalação que integra processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, matérias-primas químicas, materiais, alimentos, ração animal e energia. Com o objetivo de otimizar o uso dos recursos e reduzir a descarga de águas residuais, bem como aumentar a receita e os lucros, integram várias rotas de conversão - bioquímica, microbiana, química e termoquímica - a fim de fazer o melhor uso da biomassa e da energia contida nela.

As biorrefinarias fazem parte da agenda de PD&I na maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, pois o conceito de biorrefinamento e química verde se concentra no uso da biomassa para produzir uma cadeia de valor semelhante à dos derivados de petróleo, mas com um menor impacto ambiental. A otimização da utilização de biomassa de menor impacto visa utilizar sistemas integrados sustentáveis (matéria-prima, processos, tecnologias, produtos e resíduos) levando em conta parâmetros técnicos incluindo balanço de massa e energia, ciclo de vida, desenvolvimento sócio-econômico regional, produção e consumo de bens e serviços distribuídos e redução das emissões de gases de efeito estufa Cherubini (2010) e EMBRAPA (2021).

O conceito biorrefinaria é dinâmico e ainda em evolução, portanto, nenhum modelo ou padrão foi estabelecido. Entretanto, podem ser dados exemplos de biorrefinarias já na prática, como as que produzem açúcar, etanol e bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar, e as que produzem óleo, ração animal, biodiesel e vários outros derivados da soja Cherubini (2010) e EMBRAPA (2021).

Na Figura 1 a seguir, está representado um conceito de biorrefinaria, mostrando suas entradas, rotas e saídas, respectivamente.

Figura 1. Biorrefinaria, entradas e saídas do processo.



Fonte: EMBRAPA, 2021.

Seguindo Jong *et al* (2020) os produtos químicos desenvolvidos a partir de coprodutos e resíduos são os que possuem maior potencial de agregação de valor às cadeias produtivas da biomassa, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como os petroquímico, farmacêutico, automotivo, construção, agronegócio, cosméticos, etc. Nas biorrefinarias, de forma geral, haverá produtos de grande volume e de baixo valor econômico unitário (como, por exemplo, os biocombustíveis). Em contrapartida, haverá também produtos de pequeno volume, mas de alto valor agregado (como especialidades químicas, aditivos, etc.).

Para Cherubini (2010), atualmente, um dos principais gargalos tecnológicos para a promoção do desenvolvimento de biorrefinarias é a produção eficiente de biocombustíveis que sejam economicamente viáveis.

Dada a grande importância do Brasil no mercado de etanol de cana-de-açúcar e considerando que esta biomassa é conhecida como a matéria-prima mais eficiente para a produção de etanol 1G (MACEDO *et al.* 2008), a utilização do bagaço como matéria-prima em biorrefinarias é um ponto factível.

3.2.1 Etanol 1G

Brinkman *et al.* (2018) destacam que o Brasil é um dos maiores produtores de etanol de cana-de-açúcar do mundo, onde utiliza-se das indústrias sucroalcooleiras como estratégia para a economia nacional.

O etanol é um combustível alternativo ao de origem fóssil, sendo considerado, portanto, como uma fonte renovável de energia. Este tem apresentado um mercado crescente, competitivo e de baixos impactos ambientais.

De acordo com Mendonça e Junior (2010), o Brasil leva vantagem sobre o etanol dos Estados Unidos devido à produtividade da cana-de-açúcar em relação ao milho. Embora sejam produzidos menos litros por tonelada de matéria-prima, a produtividade da cana-de-açúcar por hectare é muito maior, o que a torna mais produtiva do que o milho dentro de uma mesma área, produzindo assim, mais etanol. Como resultado, os custos associados ao cultivo e colheita nos EUA (custo total da produção de 1000 ton de etanol é de US \$235.686,36) são muito mais altos do que o custo do etanol no Brasil (custo total da produção de 1000 ton de etanol é de US \$137.444,16), tornando este segmento da agricultura o que mais contribui para os custos gerais.

De acordo com a Renewable Fuels Association – RFA (2020), o Brasil ficou em segundo lugar no mundo com 32,44 bilhões de litros de etanol combustível produzidos em 2019, respondendo por 30% do total. O país é o segundo em volume de produção, estando entre os oito maiores produtores mundiais: Estados Unidos, Brasil, União Europeia, China, Canadá, Índia, Tailândia e Argentina.

A produção global de etanol cresceu mais de 6,6 bilhões de litros em 2019, atingindo um recorde de 110,4 bilhões de litros. Existe uma estimativa da *International Energy Agency* – IEA, que a fabricação de etanol aumente 19% até 2024, alcançando mais de 130 bilhões de litros. A produção mundial de etanol tem crescido desde 2007 devido aos avanços nas expectativas de mercado no Brasil, Estados Unidos e especialmente na China (IEA, 2019).

Com relação às outras culturas para produção de bioetanol, o de cana apresenta os melhores índices de produtividade: cerca de 9 mil litros por hectare (incluindo o etanol de biomassa), contra 2 mil litros por hectare do trigo e 4 mil do milho (SENNA; DE MATTOS ANSANELLI, 2016).

Para Abarca (2005), por ter sido produzido desde 1970, por conta do Programa Nacional do Alcool, o etanol brasileiro tem a vantagem de apresentar uma trajetória estabelecida. A produção de etanol, a partir do caldo obtido pela moagem da cana-de-açúcar, é denominado de Etanol de Primeira Geração (E1G).

Outra fonte para aumento da oferta do etanol brasileiro é a geração do produto por outros meios. A tecnologia de produção do açúcar e álcool gera resíduos como palha e bagaço, que podem ser reaproveitados na geração de energia elétrica e de mais etanol. Este último, etanol produzido a partir da biomassa da cana-de-açúcar ou Etanol de Segunda Geração (E2G), vem sendo desenvolvido desde 2010 no Brasil de forma sistêmica, envolvendo o Governo, firmas privadas nacionais e estrangeiras e instituições de pesquisa (MILANEZ, *et al.*, 2015; ANSANELLI, *et al.*, 2016).

Conforme Longati (2018), para a produção de etanol, a cana-de-açúcar chega a uma unidade industrial e ela é processada o mais rápido possível, pois é uma matéria-prima suscetível à contaminação e, portanto, estraga com facilidade. Primeiro, ele passa por um processo de limpeza para remover as impurezas trazidas do campo. Nesta etapa pode ser utilizado água (lavagem) ou ar (limpeza a seco). Em seguida, passa por um picador que tritura o colmo, preparando-o para a moagem.

Quando estiver pronta, a cana-de-açúcar picada é enviada para a etapa de extração. Esta etapa pode ser realizada usando um moedor ou um difusor. Nas usinas do Brasil, o sistema de extração por moendas é o mais comum, pois apresenta menor custo, que pode ser investido sequencialmente (pois utiliza-se de 4 a 6 ternos de moagem). O difusor, por outro lado, apresenta maior custo e demanda uma etapa final de moagem para reduzir a umidade final do bagaço (NAZATO *et al.*, 2011).

Na usina, a cana-de-açúcar picada é exposta entre rolos submetidos a alta pressão, que extrai o caldo do interior das células. A água é adicionada em um processo chamado de imersão composta, cuja função é embeber o interior das células da cana, diluindo os açúcares existentes, aumentando assim a eficiência da extração. O caldo extraído segue para o processo de beneficiamento do caldo e o bagaço vai para a caldeira.

O caldo recém-extraído contém impurezas que devem ser removidas por tratamento físico e químico para purificar e concentrar os açúcares no caldo (FURLAN, 2012; OLIVEIRA, 2014).

A remoção de impurezas também é importante para a produção de etanol, pois podem reduzir o rendimento da etapa de fermentação devido ao possível efeito inibitório dessas impurezas, ou até mesmo dificultar a reciclagem e recuperação de leveduras devido à presença de sólidos (ALBARELLI, 2013).

Para eliminar os resíduos em suspensão (principalmente bagaço) presentes no caldo, o líquido é tratado fisicamente, por peneiras rotativas e/ou hidrociclones

(FURLAN, 2012). O caldo contendo impurezas solúveis é enviado para a etapa de tratamento químico.

As etapas de tratamento químico são projetadas para remover compostos solúveis e insolúveis, partículas coloidais e suspensões, promovendo a neutralização do caldo. Essa etapa inclui o aquecimento do caldo, adição de cal, remoção do gás em tanque flash, adição de um polímero coagulante, decantação e filtração (OLIVEIRA, 2014; ALBARELLI, 2013; DIAS *et al.*, 2011).

O caldo clarificado tem uma concentração de cerca de 15° Brix e deve ser concentrado a cerca de 20° Brix antes de entrar na etapa de fermentação. Essa etapa é importante porque evita que o teor de etanol obtido na etapa de fermentação seja muito baixo, reduzindo assim o consumo de energia nas etapas posteriores (FURLAN, 2012; DIAS *et al.*, 2011). Depois de concentrado, o caldo entra na etapa de fermentação.

A fermentação é a principal etapa do processo de produção do etanol. A fermentação alcoólica é um processo bioquímico no qual os substratos são metabolizados sob a ação enzimática de leveduras. Na indústria, a produção de etanol é realizada utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, um microrganismo aeróbio facultativo (LONGATI, 2018).

De acordo com Munroe (1994), na presença de oxigênio, os açúcares presentes nesse processo são convertidos em esteróis e ácidos carboxílicos insaturados, que são essenciais para a síntese das membranas celulares, CO₂ e H₂O. Na ausência de oxigênio, sofre um processo anaeróbico no qual a maior parte do açúcar é metabolizada em etanol e dióxido de carbono. Durante esta etapa do processo, os açúcares do caldo são convertidos em etanol e dióxido de carbono e, em menor grau, outros produtos como glicerol, ácidos orgânicos e álcoois superiores.

As configurações de processo da etapa de fermentação mais utilizadas são em batelada alimentada com reciclo de células, processo conhecido como Melle-Boinot e o contínuo multi-estágio com reciclo de células. No Brasil o processo Melle-Boinot é o mais comumente encontrado nas usinas (OLIVEIRA, 2014).

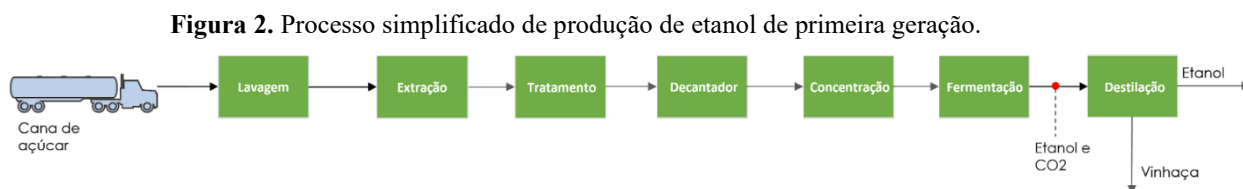
Segundo Furlan (2012) e Longati (2018), o vinho proveniente da fermentação possui concentração entre 7,0 e 10,0% de etanol em massa, dependendo do rendimento da fermentação. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), para ser considerado como álcool hidratado carburante (AEHC), o etanol deve possuir concentração entre 92,6 e 93,8% de etanol em massa e, para ser considerado etanol anidro, deve possuir uma pureza acima de 99% em massa. Assim, o vinho obtido na etapa de

fermentação é enviado para a etapa de destilação, que separa água, etanol, etanóis superiores, ácido acético e aldeído através dos seus diferentes pontos de ebulição

Conforme expôs Longati (2018), toda a energia necessária para produzir etanol vem da queima do bagaço em caldeiras que geram vapor no sistema de cogeração e, nesse caso, o vapor de alta pressão produzido pela caldeira é despressurizado em uma turbina de contrapressão antes de ser utilizado no processo. Conseqüentemente, o processo agiria como dissipador de calor para o ciclo Rankine, aumentando o aproveitamento da energia de combustão. Quando há excesso de vapor no processo, ele pode ser usado com uma turbina de condensação para aumentar a produção de eletricidade que pode ser vendida para a rede.

A utilização do bagaço e da palha trazida do campo como fonte de energia são considerados como o aproveitamento de resíduos, se tornando um diferencial para o setor sucroenergético, pois desta forma, a dependência em relação aos combustíveis diminui, sendo apenas no setor agrícola, na produção dos insumos e equipamentos utilizados na cadeia produtiva (LONGATI, 2018).

O processo simplificado de produção de etanol de primeira geração pode ser observado na Figura 2.



Fonte: Os autores, 2022.

3.2.2 Vinhaça

É um subproduto da destilação da fermentação alcoólica da cana-de-açúcar e, é um líquido residual também conhecido localmente como restilo, vinhaça e vinhoto. Considerando as diferentes matérias-primas (cana-de-açúcar na América do Sul e beterraba na Europa), as vinhaças têm características distintas, sendo a concentração de sódio no subproduto de cana-de-açúcar menor do que na de beterraba, e altos valores

desse íon são indesejáveis, pois podem causar condições prejudiciais ao solo e às plantas (GEMTOS *et al.*, 1999).

O principal componente do vinhoto é a matéria orgânica, que existe principalmente na forma de ácidos orgânicos, seguida de íons como potássio, cálcio e magnésio, fazendo com que o valor nutricional esteja relacionado à origem do mosto. Estes íons caem significativamente no mosto de caldo de cana (DA SILVA *et al.*, 2007).

De acordo com Da Silva *et al.* (2007), a vinhaça é um efluente das destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante. O poder de poluição decorre da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH (de 3,5 a 5,0), elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), variando de 20.000 a 35.000 mgL⁻¹, além de elevada temperatura na saída dos destiladores (85 a 90°C), sendo extremamente nociva à fauna e flora. A quantidade despejada pelas destilarias pode variar de 10 a 15L de vinhaça por litro de álcool produzido.

Em contrapartida, o poder fertilizante vem em razão do vinhoto ser rico em matéria orgânica e nutrientes, principalmente potássio, fazendo com que grande parte das destilarias brasileiras o utilizem na fertirrigação da cana-de-açúcar.

De acordo com Longati (2018), o conceito de biorrefinaria indica que a aplicação direta da vinhaça nos campos de plantação de cana reflete a subutilização de um matéria-prima altamente energética, visto que existem abordagens biotecnológicas que são adequadas para o processamento dessas águas residuárias. Uma abordagem/ método é a digestão anaeróbia que pode ser utilizada no tratamento da vinhaça, para reduzir seu conteúdo orgânico e preservar muitos de seus nutrientes, como potássio, nitrogênio e fósforo.

Conforme Ferraz *et al.* (2013) e Salomon *et al.* (2011), o sulfato também pode ser removido da vinhaça, pois é reduzido a sulfeto durante o processo anaeróbico. Além disso, esse processo inclui baixos custos operacionais, economia na aeração e baixa produção de lodo.

A vinhaça ainda pode ser utilizada para fertirrigação após digestão anaeróbica, diminuindo o risco de emitir uma quantidade considerável de GEE e/ou causar contaminação da água subterrânea por disposição inadequada no solo. Isto acontece porque a matéria orgânica biodegradável da vinhaça é removida no reator anaeróbio, minimizando, dessa forma, a lixiviação de metais e nutrientes devido à presença de compostos orgânicos solúveis (MORAES *et al.*, 2015).

3.2.3 Caracterização da vinhaça *in natura* e biodigerida

A vinhaça de cana de açúcar é o principal subproduto da indústria sucroalcooleira. A vinhaça de cana de açúcar, também denominada água de destilaria, águas residuais ou vinhaça, é uma solução aquosa de sólidos orgânicos e minerais, além de conteúdos residuais de açúcares, etanol e compostos voláteis com alto peso molecular (ROCHA *et al.*, 2012).

A vinhaça *in natura* é um composto ácido (pH: 3,5 - 5), polpa marrom escura, com alto teor orgânico. Este efluente consiste basicamente de água (93%) e sólidos orgânicos e minerais (7%), dos quais 75% são compostos orgânicos e biodegradáveis e os outros 25% são minerais (Laime *et al.*, 2011). Devido aos níveis significativos de nutrientes, principalmente potássio, as águas residuais são utilizadas no solo como fertilizante nas plantações de cana-de-açúcar. Este líquido é transportado para estas áreas utilizando caminhões, canais ou tubulações. Ele pode ser aplicado diretamente no solo ou pode ser espalhado por pulverização utilizando pulverizadores ou aspersores (RABELO *et al.*, 2015).

As principais características da vinhaça *in natura* produzida pelo processo de obtenção de álcool a partir do suco de cana de açúcar são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas da vinhaça *in natura* de cana de açúcar.

| Características | Unidade | Composição |
|-----------------------|------------------------------------|-------------|
| pH | - | 3,7 – 4,3 |
| Temperatura | °C | 80 - 100 |
| DBO | g O ₂ /L | 6 - 16 |
| Sólidos totais | g/L | 23,7 |
| Matéria volátil | g/L | 20 |
| Matéria fixa | g/L | 3,7 |
| Nitrogênio | g/L N | 0,15 - 0,7 |
| Fósforo | g P ₂ O ₅ /L | 0,1 - 0,21 |
| Potássio | g K ₂ O/L | 1,2 - 2,1 |
| Cálcio | g CaO/L | 0,13 - 1,54 |
| Magnésio | g MgO/L | 0,2 - 0,49 |
| Sulfato | g SO ₄ /L | 0,6 - 0,76 |
| Carbono | g C/L | 5,7 - 13,4 |
| Relação C/N | - | 19,7 - 21 |
| Matéria orgânica | g/L | 19,5 |
| Substâncias reduzidas | g/L | 7,9 |

Fonte: Adaptado de Marafon *et al.*, 2020.

A biodigestão anaeróbica pode ser considerada a principal alternativa para o manejo da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar. A técnica apresenta vantagens importantes sobre a fertirrigação, incluindo a redução da carga orgânica poluente da vinhaça, a potencial recuperação da bioenergia a partir do biogás e o potencial para aumentar a rentabilidade das biorrefinarias através da geração de eletricidade excedente com base na queima de biogás em sistemas de cogeração de energia (FUESS *et al.*, 2018; MORAES *et al.*, 2015).

A biodigestão reduz a demanda química de oxigênio da vinhaça (DQO) em cerca de 30 a 75 kg/m³. A concentração de DQO é uma medida da quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente todos os compostos orgânicos para a água e o CO₂. A quantidade de biogás produzida a partir de 1 m³ de vinhaça varia entre 7 e 15 Nm³. Considerando uma vinhaça com concentração de DQO de 30 kg/m³, o volume do reator necessário para tratar cada 1 m³ de vinhaça pode variar de 15 a 33 m³ (CORTEZ *et al.*, 2007).

Alguns fatores como o pH e as necessidades nutricionais dos microorganismos podem influenciar o processo de biodigestão. Portanto, durante a biodigestão, o pH é corrigido pela adição de substâncias alcalinas, tais como hidróxido de sódio. Alguns nutrientes, tais como nitrogênio e fósforo, também podem ser fornecidos com base na caracterização físico-química da vinhaça (ROCHA, 2009).

A Tabela 2 apresenta as características físico-químicos da vinhaça de cana-de-açúcar submetidos a biodigestão usando como base o valor o valor médio encontrado pelos autores Marafon *et al.* (2020).

Tabela 2. Características físico-químicos da vinhaça in natura de cana-de-açúcar submetidos a biodigestão.

| Características | Unidade | Vinhaça antes da biodigestão | Vinhaça depois da biodigestão |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| pH | - | 4 | 6,9 |
| DQO | g/L | 29 | 9 |
| Nitrogênio | g/L N | 0,55 | 0,6 |
| Fósforo | g/L P ₂ O ₅ | 0,017 | 0,032 |
| Potássio | g/L K ₂ O | 1,4 | 1,4 |
| Sulfato | g/L SO ₄ | 0,45 | 0,032 |

Fonte: Adaptado de Marafon *et al.*, 2020.

A composição do biogás produzido da vinhaça biodigerida pode ser encontrado na Tabela 3.

Tabela 3. Composição do biogás derivado da vinhaça.

| Características | Vinhaça antes da biodigestão |
|------------------------|-------------------------------------|
| Metano | 40 - 75 |
| Dióxido de carbono | 25 - 40 |
| Nitrogênio | 0,5 - 2,5 |
| Oxigênio | 0,1 - 1 |
| Sulfeto de hidrogênio | 0,1 - 0,5 |
| Amoníaco | 0,1 - 0,5 |
| Monóxido de carbono | 0 - 0,1 |
| Hidrogênio | 1 - 3 |

Fonte: Adaptado de Marafon *et al* 2020.

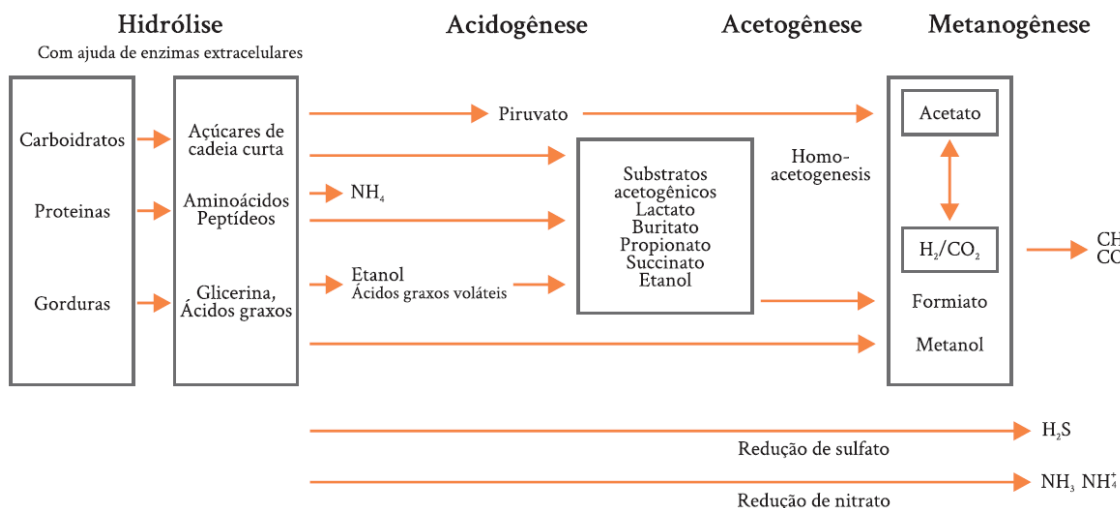
3.3 BIOGÁS E BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Segundo Kunz *et al.* (2019), a digestão anaeróbia é um processo metabólico que requer condições anaeróbias e depende da atividade conjunta de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano, conhecida como biogás.

O processo é dividido em quatro etapas, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada etapa é constituída por diferentes grupos de microrganismos, em sinergia.

As etapas da digestão anaeróbia estão representadas na Figura 3 a seguir.

Figura 3. Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: KUNZ *et al.*, 2019.

3.3.1 Hidrólise

A etapa de hidrólise degrada compostos de alto peso molecular, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, em substâncias orgânicas mais simples e solúveis. Esse processo acontece pela ação de enzimas extracelulares secretadas por bactérias hidrolíticas. Esta etapa é limitante ao processo de digestão anaeróbia, pois a velocidade de degradação dos compostos depende diretamente das propriedades do substrato. Como exemplo, a lignocelulose e lignina são hidrolisadas lentamente e de forma incompleta (KUNZ *et al.*, 2019).

3.3.2 Acidogênese

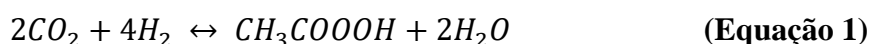
Conforme Kunz *et al.* (2019), as substâncias orgânicas simples formadas na hidrólise são utilizadas como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, sendo degradados nesta etapa a ácidos orgânicos de cadeia curta, como: álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono.

Nesta fase metabólica, a glicose é degradada em piruvato, este por sua vez, é convertido em ácido láctico por *Lactobacillales* e, em seguida, é convertido para etanol através da ação de leveduras. Os ácidos graxos são degradados a acetatos pela *Acetobacter*

e, os aminoácidos são degradados pelo *Clostridium Botulinum*, resultando na formação de acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (KUNZ *et al.*, 2019).

3.3.3 Acetogênese

A terceira etapa da digestão anaeróbia é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. As reações nesta etapa são endotérmicas, onde os ácidos de cadeia longa são convertidos em ácidos com ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), contando com a geração conjunta de hidrogênio e dióxido de carbono. Desta forma, as arqueas metanogênicas consomem o hidrogênio gasoso para manter a reação termodinamicamente favorável, pois a sinergia entre organismos microbianos distintos possibilita o crescimento, assegura a viabilidade e equilíbrio da reação de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos (Equação 1) (KUNZ *et al.*, 2019).



3.3.4 Metanogênese

A etapa final da digestão anaeróbia é a metanogênese e, esta ocorre estritamente em condições anaeróbicas para que o carbono contido na biomassa seja convertido em dióxido de carbono e metano através da ação das arqueas metanogênicas e reações exotérmicas (KUNZ *et al.*, 2019).

Conforme Kunz *et al.* (2019), as arqueas metanogênicas são divididas de acordo com suas vias metabólicas em acetoclástica e hidrogenotróficas, onde, as acetoclásticas convertem acetato a metano e, as hidrogenotróficas convertem hidrogênio e dióxido de carbono a metano.

Silva *et al.* (2014) e Kunz *et al.* (2019) relatam que a relação de colaboração entre arqueas acetoclásticas/hidrogenotróficas para a produção de metano é dinâmica, visto que, as arqueas acetoclásticas são mais sensíveis a mudanças de pH e elevadas concentrações de amônia, a qual é característica de substratos agropecuários. Desta

maneira, este fato pode acarretar no predomínio das arqueas hidrogenotróficas e, assim, o acetato produzido pela DA será oxidado por bactérias produzindo CO₂ e H₂, que servirá como substrato para as arqueas hidrogenotróficas produzirem metano.

Por fim, segundo Moraes *et al.* (2015), o metano resultante da DA pode ser queimado juntamente com o bagaço em caldeiras visando a cogeração ou juntamente com o gás de síntese da câmara de combustão de um ciclo combinado, pois possui um alto poder calorífico.

3.4 RENOVABIO

O programa brasileiro de produção de biocombustíveis, em particular o etanol de cana-de-açúcar, passou por várias fases, desde 1975, quando o regime militar do país lançou inicialmente o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) para atender aos objetivos geopolíticos e de segurança energética. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar foi estimulada pela necessidade de melhorar a balança comercial e a autossuficiência energética nacional, no contexto de um déficit comercial economicamente deletério provocado pela dependência do petróleo estrangeiro e pela crise internacional do petróleo de 1973 (BENITES, 2017; GRANGEIA,2022).

O Proálcool, em sua época, teve grande sucesso e foi responsável direto pelo desenvolvimento do setor de álcool, tendo em vista que o volume de produção de etanol no Brasil passou de 555,62 milhões de litros na safra 1975/1976 para 15,42 bilhões de litros em 1997/1998. Em 1979, os primeiros veículos movidos exclusivamente a etanol foram introduzidos no país e, em 1985, representavam 92,17% das matrículas de veículos novos, com mais de 645.000 unidades registradas (MAPA, 2013).

As vendas de veículos equipados com motores a etanol, que representaram 96% das vendas totais de automóveis e comerciais leves em 1985, desde 1979 já atingiram mais de 5,62 milhões de unidades. Em 1986, o Brasil entrou em crise econômica, pois atingiu a maior taxa de inflação já registrada até 1989. A crise financeira trouxe graves dificuldades orçamentárias e dificuldades no balanço de pagamentos e na conta que financiou o Proálcool. O problema com a falência das contas públicas levou o governo a implementar uma política geral de saque (ANFAVEA, 2019).

A crescente frota de carros movidos a etanol e, ao mesmo tempo, o fracasso das políticas para esses biocombustíveis causou escassez de etanol nos postos de combustível do país. Esse fato gerou um problema de falta de confiança entre as pessoas em relação à

disponibilidade do etanol. Esses fatos reduziram o número de carros movidos a etanol para 0,1% em 1997. Em números absolutos, o número de licenças de veículos novos a etanol passou de um pico de 697.049 veículos em 1986 para um mínimo de 1.120 unidades em 1997, naquela época os veículos bicompostíveis (flex fuel) ainda não estavam disponíveis no mercado (CNI, 2017; ANFAVEA, 2019).

A introdução dos veículos flex fuel (FFV - da sigla em inglês, *flex fuel vehicle*) no Brasil ocorreu a partir de 2003 e determinou a retomada do uso do etanol como combustível no país. O FFV permite o uso de qualquer proporção de etanol ou gasolina ao mesmo tempo. Além disso, o aumento da renda do consumidor e a disponibilidade de crédito foram os fatores básicos que estimularam o aumento do número de veículos utilizados pelas pessoas nas áreas rurais e urbanas (FREITAS e KANEKO, 2011; CARDOSO *et al.*, 2019; GRASSI e PEREIRA, 2019).

A partir da experiência do Proálcool, foi iniciado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), lançado em 2005, que inclui medidas do Proálcool com foco no fornecimento de biodiesel, e com fortes aspectos de desenvolvimento regional. O PNPB inicialmente exigia que 2% do diesel fosse substituído por biodiesel de 2008 a 2012 e aumentou para 5% a partir de 2013, chegando a 15% até 2023, enquanto os benefícios ambientais dos biocombustíveis foram reconhecidos posteriormente (STATTMAN, 2013; DE MORALES, 2014).

Em 2017, para encorajar a inserção de biocombustíveis na matriz de transportes brasileira, foi implementada a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei 13.576/2017 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2017). RenovaBio é um resultado da iNDC (*intended Nationally Determined Contribution*) buscando atender aos compromissos que o Brasil assumiu na 21ª Conferência das Partes - COP21 e das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em Paris-França estabelecendo a meta de reduzir a emissão de carbono em no mínimo 43% até 2030 em comparação às emissões de 2005 (MME, 2017).

A RenovaBio tem como estratégia promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis, fazem parte dos seus princípios a contribuição do mercado de biocombustíveis para a geração de emprego, de renda e para o desenvolvimento regional, bem como para a promoção de cadeias de valor relacionadas à bioeconomia sustentável (BRASIL, 2015, 2017; MME, 2019).

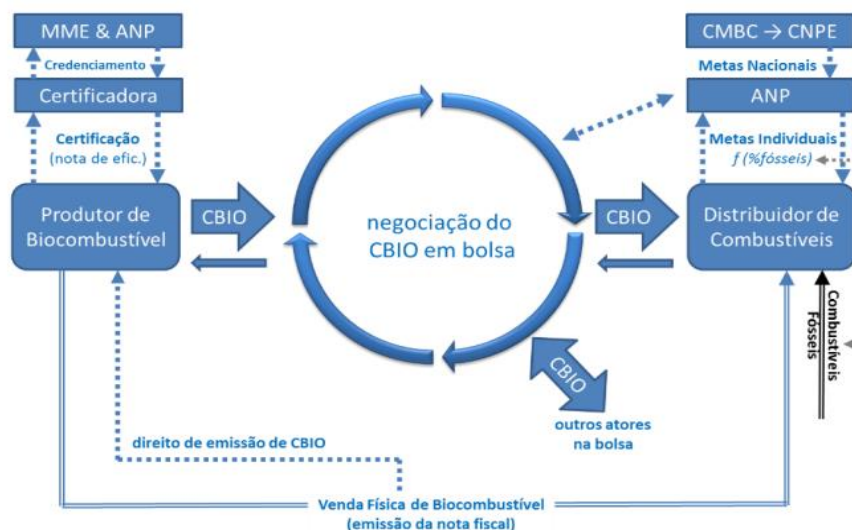
O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabelece metas anuais obrigatórias para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Esses compromissos

são estabelecidos para CBIOS (crédito de descarbonização) com objetivo quantitativo anual em milhões de CBIOS e intervalos de tolerância com limites superior e inferior. A meta está prevista para durar até 31 de dezembro de 2030. Essas metas devem contribuir para aumentar a produção de biocombustíveis (CNPE, 2020).

3.4.1 Créditos de Descarbonização (CBIOS)

De acordo com o CNPE (2020) e MME (2017) os CBIOS são um documento projetado para verificar se as distribuidoras de combustível cumprem suas metas individuais de adesão de descarbonização. Este é o principal elemento da RenovaBio, o qual é emitido somente mediante a comercialização de biocombustíveis por produtores (ou importadores de biocombustíveis) autorizados pelo ANP que cumpram voluntariamente o procedimento de certificação realizado por empresas de inspeção, também credenciadas pela ANP. Os distribuidores de combustíveis líquidos, por sua vez, terão como objetivo adquirir CBIOS proporcionalmente à sua meta de participação no mercado nacional. A Figura 4 mostra o processo de trabalho do RenovaBio.

Figura 4. Esquema de funcionamento da RenovaBio.



Fonte: MME, 2017.

Com base em Ubirajara (2021) e ANP (2019f) através da certificação da produção de biocombustíveis, são atribuídas diferentes notas a cada produtor e importador de

biocombustível, com um valor inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido. A nota refletirá precisamente a contribuição individual de cada agente produtor de biocombustível para a mitigação de uma quantidade específica de GEEs em relação ao combustível fóssil que substitui (em termos de toneladas de CO₂eq).

A ANP, juntamente com o Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO), verifica fielmente a emissão do CBIOS e o acompanhamento e controle das metas anuais obrigatórias de redução de emissões de GEEs pelas distribuidoras de combustíveis. O procedimento realizado por essas entidades calcula, com base na nota de eficiência energético-ambiental contida, a quantidade de CBIOS a ser registrada. Finalmente, os escrituradores (bancos ou instituições financeiras que emitiram CBIOS escriturais em nome do produtor certificado de biocombustível) reservam o CBIOS com referência a essas comercializações de biocombustíveis (ANP, 2019o; SERPRO, 2020).

O programa RenovaBio utiliza uma referência metodológica baseada em parâmetros internacionais e uma ferramenta para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis denominada RenovaCalc, a partir de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de toda a cadeia de produção de biocombustíveis (MME, 2017).

Para determinar a intensidade de carbono dos biocombustíveis no RenovaBio, foi desenvolvido um protocolo de avaliação de desempenho ambiental, baseado na ACV, para investigar os efeitos ambientais de um produto durante todo seu ciclo de vida a partir da contabilidade do material e da energia consumidos durante os processos produtivos e emitidos para a natureza, desde a extração até a disposição final do produto. Tais análises são padronizadas de acordo com as normas ISO14040 (ABNT, 2014a) e 14044 (ABNT, 2014b).

3.4.2 RenovaCalc

A RenovaCalc foi desenvolvida em parceria entre o Ministério do Meio Ambiente e o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol – CTBE, com o objetivo de contabilizar a intensidade de carbono de um biocombustível (em g CO₂ eq./MJ), e quantificar o benefício ambiental de determinado biocombustível comparando com o seu combustível fóssil equivalente. Atualmente, corresponde a um conjunto de planilhas na

plataforma Excel©, contendo um banco de dados e uma estrutura de cálculo específica para cada tipo de biocombustível.

Na RenovaCalc, para cada rota de biocombustível são solicitados dados gerais de identificação da Unidade Produtora, informações sobre o cumprimento dos critérios de elegibilidade ao programa (relacionados a medidas de controle para evitar a supressão da vegetação nativa) e dados do processo produtivo, distribuídos em: a) Fase agrícola (quando pertinente); b) Fase industrial; c) Fase de distribuição (transporte). A calculadora contabiliza as emissões a partir das informações da fase agrícola e industrial fornecidas pelos produtores dos biocombustíveis, gerando o índice de intensidade de carbono do biocombustível, que posteriormente é subtraído do índice do combustível fóssil correspondente, gerando a sua Nota de Eficiência Energético-Ambiental (em g CO₂ eq./MJ) (MATSUURA *et al.*, 2018).

Dessa maneira, o RenovaBio estimula a melhoria do desempenho ambiental dos biocombustíveis em relação aos combustíveis fósseis para assim adquirir mais Créditos de Descarbonização por meio dessas notas de eficiência energético-ambiental.

Além da descarbonização da mistura de combustíveis, o programa RenovaBio é também uma forma de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e minimizar os impactos da volatilidade dos preços do petróleo no comércio de biocombustíveis. Desde 2009, o preço médio do petróleo tem variado de US\$43 a US\$111 por barril. Em 2020 o preço caiu drasticamente, negociando a US\$11,50 por barril, o mais baixo em duas décadas, devido a uma queda na procura causada pela pandemia COVID19, bem como a conflitos entre a Rússia e a Organização dos Países Exportadores de Petróleo. Estas flutuações afetaram diretamente o mercado de combustíveis; a RenovaBio pretende minimizar estes e outros impactos no mercado em favor da proteção da produção de biocombustíveis (UBIRAJARA, 2021).

Muitos efeitos positivos são esperados da política do RenovaBio, como estimular o mercado de biocombustíveis pela expansão das cadeias produtivas de biocombustíveis com melhores perfis de emissões ambientais. Espera-se que os CBIOS forneçam incentivos financeiros para a expansão do mercado de biocombustíveis. Como os incentivos aos ganhos de produtividade agrícola e à eficiência industrial devem ser promovidos pelo RenovaBio, espera-se também que os custos de produção de biocombustíveis não aumentem (UBIRAJARA, 2021).

3.4.3 A Certificação

Conforme com a ANP (2018) o processo de certificação ocorre mediante a avaliação da empresa inspetora. Para obter o crédito de descarbonização um emissor primário (produtor ou importador de biocombustível autorizado pela ANP) e que tenha obtido o Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis, poderá solicitar a emissão do CBIO em quantidade proporcional ao volume de biocombustível produzido ou importado e comercializado, relativamente a sua nota de eficiência energético ambiental.

3.5 VIABILIDADE ECONÔMICA

De acordo com a Propeq (2020), a análise de viabilidade econômica de um processo é imprescindível para saber quais recursos financeiros um processo demandará e se ele é, de fato, economicamente viável. Esse tipo de análise deve perpassar todo tipo de implementação ou alteração na produção, incluindo o *scale up*, isto é, o processo de aumento na escala produtiva – seja ele no início do processo, quando se vai da escala laboratorial ou piloto para a industrial, seja ele no aumento da quantidade daquilo que já é fabricado.

Assim, a análise econômica se torna essencial para a elaboração do *scale up*, que deve levar em consideração um conjunto de fatores como a demanda pelo que é produzido, as variáveis que abrangem o processo produtivo e a articulação de inúmeros conceitos correlatos (PROPEQ, 2020).

Conforme o projeto é desenvolvido e definido quais equipamentos, utilidades, instrumentação e materiais serão utilizados, é possível fazer uma estimativa mais precisa, já de posse de um diagrama mais completo. Os tipos dos diagramas de processo são:

- BFD: Diagrama de blocos;
- PFD: Diagrama de fluxo de processos;
- P&ID: Diagrama de processo e instrumentação.

Além disso, dentro dos níveis de estimativa pode-se prever o custo de equipamentos específicos ou também da planta como um todo. Muitos itens devem ser levados em consideração nesse caso, como, por exemplo, os citados abaixo:

- Custos diretos: mão de obra e material;
- Custos indiretos: transporte, seguro, despesas gerais;
- Contingências e taxas: gastos não previstos;
- Instalações auxiliares: preparação do terreno e prédios auxiliares.

3.5.1 *Operating Expenses* (OPEX)

Basicamente, o OPEX são os custos ordinários e habituais que uma empresa tem para executar suas operações do dia-a-dia. O OPEX representa uma medida central da eficiência financeira de uma empresa ao longo do tempo. Afinal, analisar as despesas operacionais é essencial para calcular o fluxo de caixa e obter um panorama financeiro claro de como as operações estão impactando a receita (INVESTNEWS, 2022).

3.5.2 *Capital Expenditure* (CAPEX)

O CAPEX representa os investimentos em bens de capital que estão associados à aquisição de equipamentos ou instalações, como a compra de novas máquinas. O CAPEX, também conhecido como Capital Fixo, consiste nos custos iniciais para a construção de uma planta, que não farão parte dos custos cotidianos da produção (PROPEQ, 2020).

Para calcular o preço de compra dos equipamentos em 2021, utilizou-se a regra dos seis décimos tendo como referência o ano de 2017 para fazer o *scale up*, pois a relação entre a capacidade produtiva de um equipamento e o custo de compra não é linear.

Desta maneira, conforme a Propeq (2020), a razão dos custos (A) equivale à razão das capacidades (C) elevada de um expoente de custo (n), o qual está relacionado a cada tipo de equipamento. Segundo a regra dos seis décimos, n tende a 0,6 quando se trata de uma planta com vários equipamentos. Uma vez que se faz uma estimativa de custo, é suficiente considerar esse valor médio, pois trabalha-se com uma aproximação que leva em consideração toda a planta.

3.5.3 Valor Presente Líquido (VPL)

De acordo com a Harvard Business Review (2014) o valor presente líquido é a diferença entre o valor presente das entradas e saídas de caixa durante um período de tempo. O VPL é usado no orçamento de capital e planejamento de investimento para analisar a rentabilidade de um investimento ou projeto. Sendo assim, é o resultado de cálculos que encontram o valor atual de um fluxo futuro de pagamentos, utilizando a taxa de desconto apropriada. Em geral, os projetos com um VPL positivo valem a pena ser realizados enquanto aqueles com um VPL negativo não o são. A fórmula do VPL é apresentada pela Equação 3.

$$VPL = \sum_{i=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad \text{(Equação 2)}$$

onde n representa a duração do projeto;

i é a taxa de desconto ou taxa mínima;

R_t o fluxo de caixa durante o certo período t ;

e t é o período de tempo.

O VPL representa o valor temporal do dinheiro e pode ser usado para comparar as taxas de retorno de diferentes projetos, ou para comparar uma taxa de retorno projetada necessária para aprovar um investimento. Nesse caso, escolhe-se o investimento que retorne o maior capital, independentemente do valor investido.

O valor temporal do dinheiro é representado na fórmula do VPL pela taxa de desconto, que pode ser uma taxa de obstáculo para um projeto com base no custo de capital de uma empresa. Não importa como a taxa de desconto é determinada, um VPL negativo mostra que a taxa de retorno esperada ficará abaixo dela, o que significa que o projeto não criará valor.

4. METODOLOGIA

4.1 SIMULADOR DE PROCESSOS

A destilaria convencional de etanol, juntamente com os sistemas de biodigestão da vinhaça foram modelados com o simulador de processos EMSO, uma ferramenta para modelagem, simulação e otimização de processos dinâmicos e estacionários com arquitetura de resolução de modelos orientada a equações. Essa plataforma de simulação teve sua origem como resultado de um esforço colaborativo de desenvolvimento de um simulador de processos nacional no projeto ALSOC (Ambiente Livre para Simulação, Otimização e Controle de Processos), iniciado em 2003 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

De acordo com Longati (2018), o software permite que arquivos de estimativa inicial sejam usados para algumas ou todas as variáveis, auxiliando na convergência do modelo. Assim, há uma redução no número de iterações e no tempo necessário para a convergência dos modelos. O simulador também oferece verificação automática da consistência das unidades de medida, graus de liberdade e consistência das condições iniciais (SOARES; SECCHI, 2003), além de oferecer uma biblioteca de modelos livres e de código aberto. O EMSO também permite o uso de rotinas externas escritas em C, C++ e Fortran para utilizar o código existente nessas linguagens para solucionar determinado problema (FURLAN, 2012). Além disso, a linguagem se assemelha a uma linguagem matemática comum e proporciona ao usuário um bom grau de flexibilidade (SOARES; SECCHI, 2003).

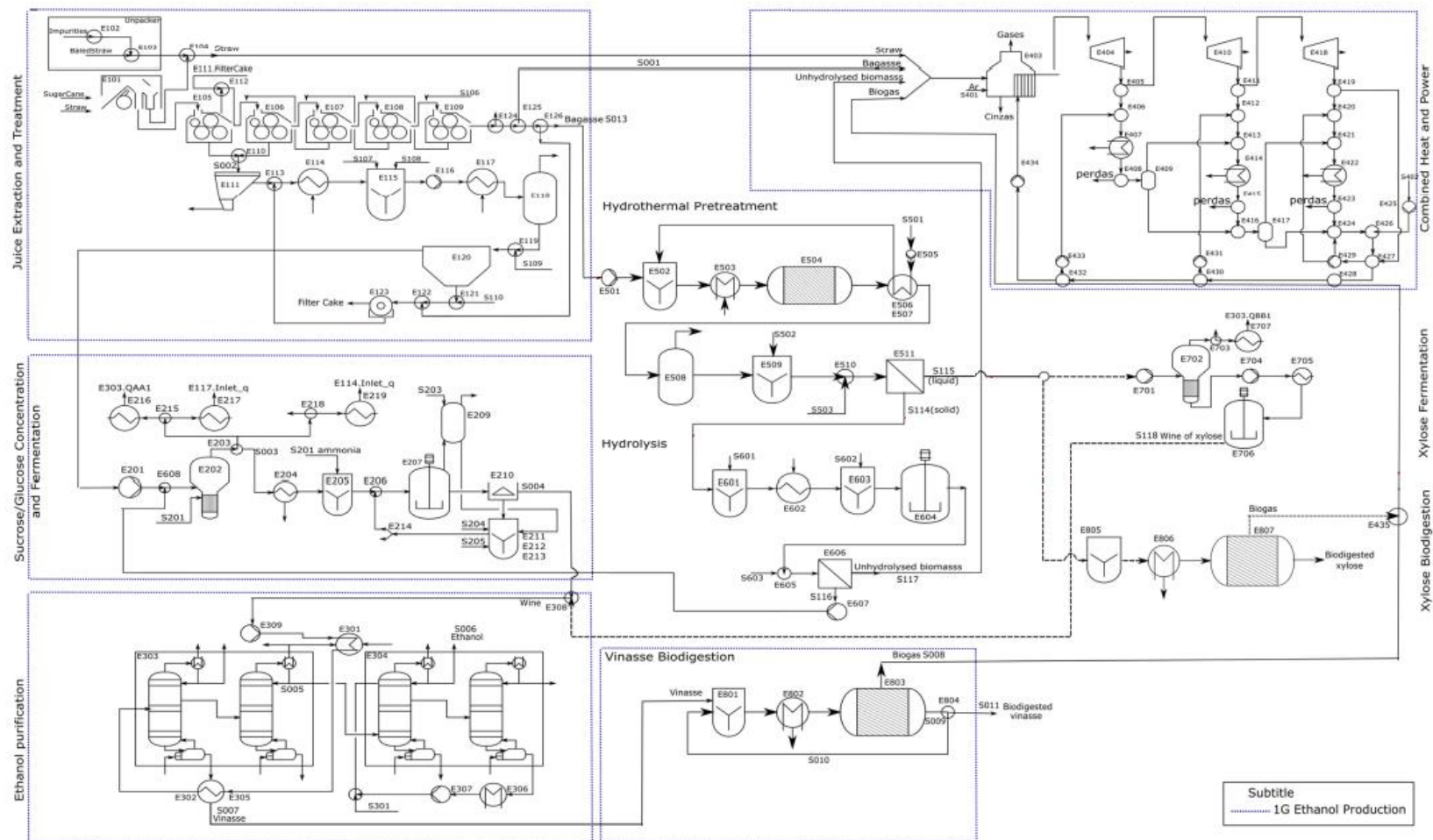
4.2 DESCRIÇÃO DA BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O processo de produção de etanol 1G foi simulado para uma unidade industrial típica (que processa 4 milhões de toneladas por safra que corresponde a 833 toneladas de cana-de-açúcar por hora). Este será o caso base, representando a tecnologia atual. Uma representação esquemática do processo geral de biorrefinaria da cana de açúcar é ilustrada na Figura 5. Primeiro, a cana de açúcar é limpa a seco (E-101) para remover a sujeira transportada durante a colheita. Em seguida, os açúcares são extraídos por pressão mecânica (E-105 a E-109). Dois fluxos são gerados: o bagaço de cana de açúcar (S-001) e o caldo de cana de açúcar (S-002). O primeiro é queimado como combustível na caldeira

(E-403), sendo que 50% da palha da cana-de-açúcar produzida no campo é adicionada a este fluxo. O caldo (S-002) segue os passos de tratamento (E-111 a E123) e evaporação (E-202) para remover as impurezas e corrigir a concentração de açúcar. O caldo concentrado (S-003) é fermentado (E-207) pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, produzindo uma solução alcoólica diluída (denominada como vinho) (S-004), que é purificada em um conjunto de colunas de destilação (E-303), produzindo bioetanol hidratado. O bioetanol hidratado (S-005) é enviado para a etapa de desidratação (E-304) e o produto final é bioetanol anidro (S-006). O monoetilenoglicol é utilizado nas colunas de desidratação. A efluente vinhaça (S-007) da etapa de destilação pode (ou não) ser enviado para uma unidade de biodigestão (E-803) para produzir biogás (S-008). O bagaço, por outro lado, é enviado para a caldeira para produzir vapor e energia elétrica em um ciclo Rankine, para atender às demandas do processo. O excedente de eletricidade é vendido para a rede. Mais detalhes sobre o processo 1G podem ser encontrados em Dias *et al.* (2011) e Furlan *et al.* (2012).

Nas colunas de destilação, a vinhaça in natura é obtida. Essa vinhaça tem dois possíveis caminhos: para o campo na fertirrigação ou para a unidade de digestão anaeróbia para produzir biogás. Quando a vinhaça é enviada para o processo de digestão anaeróbia, essa vinhaça é encaminhada para um tanque de mistura para ajustar a carga de DQO que entra no reator e posteriormente a corrente de vinhaça é resfriada para ajustar a temperatura em 55°C. Então, a vinhaça é enviada ao reator de biodigestão anaeróbica de fase metanogênica (para a unidade de sistema simples). Do reator saem duas correntes: uma corrente líquida e uma corrente de gases. A corrente líquida consiste na vinhaça tratada, a qual possui os compostos orgânicos solúveis que não foram convertidos e os nutrientes que não são afetados pelo processo de digestão. Esta corrente é destinada para uso em lavouras. A corrente de gás produzida é o biogás que é formado por uma mistura contendo principalmente metano e dióxido de carbono. De acordo com Castanon (2002) e Salomon (2007), a quantidade de biogás produto da biodigestão corresponde somente a 2,0 a 4,0% do peso da matéria orgânica utilizada no processo.

Figura 5. Fluxograma da biorrefinaria implementada no simulador EMSO.



Fonte: Longati, 2018.

A composição e os componentes considerados nos fluxos utilizados na simulação da biorrefinaria da cana de açúcar são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. Estes componentes são os mais relevantes no processo industrial e foram as especificações utilizadas na simulação (parâmetros do processo).

Tabela 4. Composição da cana-de-açúcar.

| Componente | Composição (%) | Referência |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Composição Cana-de-açúcar | | |
| Água | 69,864 | |
| Sacarose | 14,033 | |
| Glicose | 1,303 | Rocha <i>et al.</i> (2012) |
| Fibras | 13,653 | |
| Terras/cinzas | 1,147 | |
| Composição Fibra de cana-de-açúcar | | |
| Celulose | 43,38 | |
| Hemicelulose | 25,63 | |
| Lignina | 23,24 | Rocha <i>et al.</i> (2012) |
| Cinzas | 2,94 | |
| Impurezas | 4,81 | |
| Composição Fibra de cana-de-açúcar | | |
| Celulose | 46,05 | |
| Hemicelulose | 27,20 | Bonomi <i>et al.</i> (2012) |
| Lignina | 24,67 | |
| Cinzas | 2,08 | |

Fonte: Adaptado de Longati *et al.*, 2019.

Tabela 5. Componentes usados na simulação da biorrefinaria.

| Componente | No. Item | Componente | No. Item | Componente | No. Item |
|------------------|----------|--------------------------------|----------|-------------------|----------|
| Fluidos | | Fluidos | | Sólidos | |
| Água | 1 | MEG ² | 13 | Celulose | 25 |
| Sacarose | 2 | O ₂ | 14 | Hemicelulose | 26 |
| Glicose | 3 | N ₂ | 15 | Lignina | 27 |
| Fibras | 4 | CH ₄ | 16 | Cinzas | 28 |
| Xilose | 5 | Lignina | 17 | Enzima | 29 |
| Etanol | 6 | Xilano | 18 | Fermento | 30 |
| Ácido Acético | 7 | H ₂ SO ₄ | 19 | CaOH ₂ | 31 |
| Furfural | 8 | NaOH | 20 | Fosfato de cálcio | 32 |
| HMF ¹ | 9 | Álcool isoamilico | 21 | Impurezas | 33 |
| Glicerol | 10 | Xilitol | 22 | | |
| Amônia | 11 | Ácido Fosfórico | 23 | | |

4.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA

Fundamentando-se em Longati *et al* (2019), a vinhaça produzida na unidade de destilação (corrente S-007 na Figura 5) foi enviada para uma unidade de digestão anaeróbica termofílica (E-801 a E-803) para produção de biogás (S-008), como ilustrado na Figura 8. A vinhaça *in natura* é enviada para um tanque de equalização (E-801), onde é misturada com vinhaça tratada reciclada (S-009). Esta etapa é necessária para ajustar a demanda química de oxigênio na entrada (DQO) de carga. A corrente de vinhaça é resfriada para atender a temperatura ótima de entrada do biorreator e, desta maneira, é alimentada para o reator de digestão anaeróbica (E-803). Duas correntes deixam o reator. A corrente de gás é o biogás (S-008). A corrente de líquido é a vinhaça tratada (S-009), que contém os compostos de matéria orgânica solúvel não convertida. Parte desta corrente é reciclada (S-010) e o restante é enviado ao campo para fertirrigação (S-011). Foi considerado que nenhuma corrente sólida (lodo contendo a biomassa produzida no reator) deixa o reator, já que a quantidade de biomassa produzida no reator é pequena.

Foi assumido que as quantidades produzidas de metano e dióxido de carbono são as mesmas para toda a matéria orgânica solúvel. A vinhaça do processo 1G é quantificada em termos de conteúdo de açúcares, que são usados para estimar a taxa de carga orgânica (TCO). Foram utilizados os parâmetros de processo para a biodigestão de Ferraz *et al* (2016).

O modelo da unidade de digestão anaeróbica inclui balanços de massa e energia, cuja solução fornece a taxa de fluxo de biogás, recuperação de bioenergia como eletricidade ou biometano. O biogás e a biomassa produzidos são obtidos com base na remoção da demanda química de oxigênio (DQO) da corrente de entrada (na vinhaça *in natura*). Além disso, foi assumido que toda a vinhaça produzida pela usina de cana-de-açúcar foi processada para a produção de biogás. Detalhes sobre as equações implementadas e todas as considerações desta etapa podem ser encontradas em Longati *et al* (2018) e foram omitidas por uma questão de simplicidade. As Tabelas 6 e 7 mostram os principais parâmetros da unidade de digestão anaeróbica utilizada para as simulações.

Tabela 6. Principais parâmetros de entradas adotados nas simulações.

| Características | Valor | Referência |
|--|----------------|------------------------------|
| Entrada de cana-de-açúcar | 833 ton/h | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Entrada de cana-de-açúcar | 4,0 mi ton/ano | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Entrada de palha de cana-de-açúcar | 75,36 ton/h | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Horas trabalhadas (240 dias com 87,5% de tempo útil) | 4788,48h | Assumido |

Fonte: Adaptado de Longati, 2018.

Tabela 7. Principais parâmetros de etapas adotados nas simulações.

| Produção de etanol de primeira-geração | | | |
|---|---|---------------|------------------------------|
| Limpeza | Perdas de açúcares | 0,50% | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Eficiência de limpeza de impurezas minerais | 60%-80% (65%) | |
| | Eficiência de limpeza de impurezas vegetais | 65% | |
| Extração | Consumo de energia | 16 kW*h/TC | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Recuperação de açúcares | 96% | |
| | Teor de água do bagaço de cana-de-açúcar | 50% | |
| | Fluxo de água | 30% m/m | |
| | Temperatura da água de embebição | 50 °C | |
| Tratamento | Temperatura de saída do caldo diluído (depois do primeiro aquecedor) | 70°C | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Quantidade de óxido de cálcio (CaO) adicionado no tanque de calagem | 0,5-0,8 kg/TC | |
| | Temperatura de saída do caldo diluído (depois do segundo aquecedor) | 105°C | |
| Decantador | Temperatura de operação | 97°C | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Concentração de sólidos no lodo | 9,0% | |
| | (sólidos solúveis e insolúveis) Eficiência da decantação dos sólidos insolúveis | 99,7% | |
| | Retenção de sólidos (eficiência) | 70% (média) | |
| | Umidade da torta | 75-80% | |
| | Perda de açúcar na torta em relação ao lodo | 1,8-2,0% | |
| | Adição de água no filtro | 30 kg/TC | |

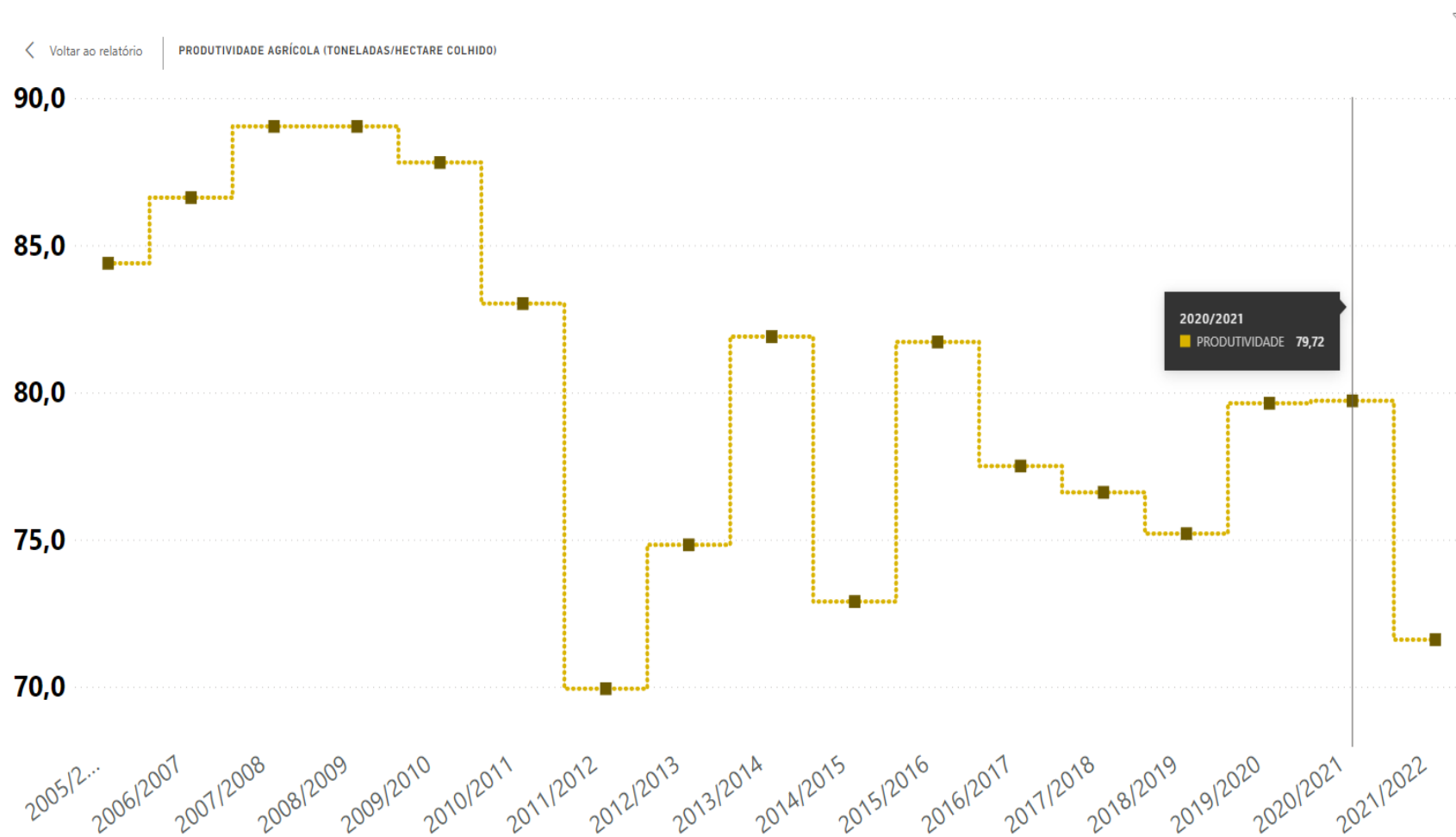
| | | | |
|---|---|----------------|---------------------------------|
| Concentração | Temperatura de operação | 115°C | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Brix de saída do caldo | 20° Brix | |
| Fermentação | Temperatura de operação | 30°C | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Rendimento de fermentação | 90% | |
| Destilação | Pureza do etanol hidratado | 93,50% | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Pureza do etanol anidro | 99,30% | |
| Cogeração | Temperatura de vapor de 65 bar | 485°C | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| | Eficiência da caldeira 65 bar / base PCI | 86% | |
| | Eficiência das turbinas isoentrópicas | 80% | |
| | Eficiência do gerador de energia elétrica | 95,80% | |
| Calor de combustão molar – Celulose | | -2804,2 kJ/mol | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Calor de combustão molar – Hemicelulose | | -2170,9 kJ/mol | |
| Calor de combustão molar – Lignina | | -5243 kJ/mol | |
| Calor de combustão molar – Metano | | -802,9 kJ/mol | |

Fonte: Adaptado de Longati, 2018.

4.4 RENOVCALC

Neste estudo a inserção de dados na ferramenta RenovaCalc baseou-se principalmente em estudos dos autores Prado *et al* (2013), Du *et al* (2017), Longati *et al* (2018) e Nunes *et al* (2020). Para questões de simplificações do processo, alguns valores foram tomados como zero (0).

Para estimar a área total, a entrada anual de cana-de-açúcar (Tabela 6.1) foi dividida pela produtividade agrícola média do Estado de São Paulo na safra do ano de 2020/2021, sendo 79,72 toneladas/hectare colhido. A Equação 3 apresenta o cálculo da área total.

Figura 6. Produtividade agrícola média do Estado de São Paulo por safras.

Fonte: Observatório da Cana e Bioenergia, 2022.

$$\frac{4.000.000 \text{ ton}}{79,72 \frac{\text{ton}}{\text{ha}}} = 50.175,61 \text{ ha} \quad \text{(Equação 3)}$$

Os demais dados utilizados para preencher a RenovaCalc estão dispostos na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8. Parâmetros utilizados para a fase agrícola.

| Informações Gerais | | | |
|--|--------------|--|------------------------------|
| | Valor | Unidade | Referência |
| Sistema de plantio | Direto | - | |
| Área Total | 50.175,61 | ha | Assumido |
| Produção total colhida para moagem | 4,00 | mi ton cana | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Quantidade comprada pela unidade produtora de biocombustível | 0,00 | ton cana | |
| Teor de impurezas vegetais (base úmida) | 70,00 | kg/t cana | Assumido |
| Umidade das impurezas vegetais | 15,00 | % | |
| Teor de impurezas minerais | 8,50 | kg/ton cana | Assumido |
| Palha recolhida (base seca) | 280.000 | ton palha | |
| Tipo de dados fornecidos | Primário | - | Assumido |
| Área queimada | 0,00 | ha | |
| Corretivos | | | |
| Calcário calcítico | 9,78 | kg/ton cana | |
| Calcário dolomítico | 0,00 | kg/ton cana | Du <i>et al</i> (2017) |
| Gesso | 4,89 | kg/ton cana | |
| Fertilizantes Sintéticos | | | |
| Ureia | 1,92 | kg N/ton cana | Du <i>et al</i> (2017) |
| Fosfato monoatômico (MAP) | 0,00 | kg N/ton cana | Assumido |
| Fosfato monoatômico (MAP) | 1,31 | kg P ₂ O ₅ /ton cana | RenovaCalc ¹ |
| Fosfato diatômico (DAP) | 0,00 | kg N/ton cana | Assumido |
| Fosfato diatômico (DAP) | 0,23 | kg P ₂ O ₅ /ton cana | RenovaCalc ¹ |
| Nitrato de amônio | 0,29 | kg N/ton cana | RenovaCalc ¹ |
| Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN) | 0,00 | kg N/ton cana | Assumido |
| Amônia anidra | 0,00 | kg N/ton cana | |

| | | | |
|---|----------|---|------------------------------|
| Sulfato de Amônio | 0,00 | kg N/ton cana | |
| Nitrato de amônio e cálcio (CAN) | 0,00 | kg N/ton cana | |
| Superfosfato simples (SSP) | 1,00 | kg P ₂ O ₅ /ton cana | RenovaCalc ¹ |
| Superfosfato triplo (TSP) | 0,00 | kg P ₂ O ₅ /ton cana | Assumido |
| Cloreto de potássio (KCl) | 2,21 | kg K ₂ O/ton cana | Du <i>et al</i> (2017) |
| Outros | 0,00 | kg N/ton cana | |
| Outros | 0,00 | kg P ₂ O ₅ /ton cana | Assumido |
| Outros | 0,00 | kg K ₂ O/ton cana | |
| Fertilizantes Orgânicos/Organominerais | | | |
| Vinhaça | 1.080,00 | L/ton cana | Assumido |
| Concentração de N | 0,36 | g N/L | Nunes <i>et al</i> (2020) |
| Torta de filtro (base úmida) | 40,00 | kg/ton cana | Prado <i>et al</i> (2013) |
| Concentração de N | 2,80 | g N/kg | Prado <i>et al</i> (2013) |
| Cinzas e fuligem (base úmida) | 14,00 | kg/ton cana | |
| Concentração de N | 0,00 | g N/kg | |
| Outros | 70,00 | kg/ton cana | Assumido |
| Concentração de N | 0,00 | g N/kg | |
| Outros | 0,00 | kg/ton cana | |
| Concentração de N | 0,00 | g N/kg | |
| Combustíveis e Eletricidade | | | |
| Diesel-B10 | 0,00 | L/ton cana | |
| Diesel-B11 | 0,00 | L/ton cana | Assumido |
| Diesel-B15 | 0,00 | L/ton cana | |
| Diesel-BX | 6,00 | L/ton cana | Assumido |
| Teor de biodiesel na mistura | 10,00 | % | EPBR (2022) |
| Diesel-B20 | 0,00 | L/ton cana | |
| Diesel-B30 | 0,00 | L/ton cana | |
| Biodiesel-B100 | 0,00 | L/ton cana | |
| Gasolina C | 0,00 | L/ton cana | |
| Etanol hidratado | 0,00 | L/ton cana | |
| Biometano de terceiros | 0,00 | Nm ³ /ton cana | Assumido |
| Biometano próprio | 0,00 | Nm ³ /ton cana | |
| Eletricidade da rede - mix médio | 0,00 | kWh/ton cana | |
| Eletricidade - PCH | 0,00 | kWh/ton cana | |

| | | |
|-------------------------|------|-----------------|
| Eletricidade - biomassa | 0,00 | kWh/ton cana |
| Eletricidade - eólica | 0,00 | kWh/ton cana |
| Eletricidade - solar | 0,00 | kWh/ton cana |

RenovaCalc¹ – parâmetro obtido da aba “dados agrícolas padrão” da ferramenta RenovaCalc.

Fonte: Os autores, 2022.

Os parâmetros utilizados para a fase industrial, de transporte e de emissões de uso da RenovaCalc foram simuladas no software EMSO, uma vez que toda a base de dados dos insumos estão cadastrados no programa.

A partir destes dados, o EMSO calculou a intensidade de carbono, nota de eficiência e CBIO, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7. Cálculo da intensidade de carbono, nota de eficiência e CBIO no EMSO.

```

EQUATIONS
Intensidade_carbono = Emissao_agricola
                    + Emissao_industrial
                    + Emissao_transporte
                    + Emissao_uso
;
Nota_eficiencia = Fossil_ref - Intensidade_carbono;

#Calculo do CBIOS
VARIABLES
Flowrate_etanol as flow_mass;
Cbio as positive (Unit='t/h');

EQUATIONS
Cbio = Nota_eficiencia * PCI_etanol * Flowrate_etanol;

```

Fonte: Os autores, 2022.

4.5 ANÁLISE DE CUSTO

Com base no inventário e dados levantados nos tópicos anteriores e, através dos métodos de cálculos citados a seguir (CAPEX, OPEX, Regra dos Seis Décimos e VPL), foi possível fazer uma análise de custo da planta de produção da biorrefinaria, com e sem o processo de DA, por meio do software EMSO.

Na simulação utilizada para a biorrefinaria autônoma já está incluso o cálculo de custos, desta maneira, foi necessário apenas realizar a inclusão dos custos do processo de DA. Desta maneira é factível a análise da viabilidade da planta de produção.

Primeiramente, foi calculado o custo total dos equipamentos, que em suma, é a somatória de custos do setor de recepção e extração; evaporação; fermentação, destilação e desidratação; calor e energia elétrica (cogeração); e digestão anaeróbia.

4.5.1 Cálculo do OPEX

O cálculo do custo total de produção (OPEX) foi feito através do somatório de custos gerais, custos de manufaturas e custos fixos. O custo geral engloba o gasto com administração, distribuição/marketing e pesquisa e desenvolvimento. O custo de manufatura considera o custo direto de produção (matéria-prima, mão de obra, royalties de patentes etc.) e o custo indireto de produção (manutenção, supervisão da operação, média salarial, etc). Por fim, o custo fixo é a soma dos custos com manutenção das máquinas, depreciação dos produtos, seguro e IPTU/aluguel.

4.5.2 Cálculo do CAPEX

Para o CAPEX, o cálculo de custo realizado envolveu a soma dos custos diretos (custo total dos equipamentos), custos indiretos (construção, engenharia e infraestrutura) e o capital de giro.

4.5.3 Utilização da Regra dos Seis Décimos

Neste estudo, utilizou-se a regra dos seis décimos para fazer um aumento de escala do valor dos equipamentos utilizados em 2017 para 2021. A Figura 8 a seguir expõe o código utilizado para regra dos seis décimos.

Figura 8. Utilização da regra dos seis décimos para *scale up* dos equipamentos.

```

#uma usina que produziu 340milhoes m3 de etanol
EtOHprodCost = 1 #fator de instalacao
* AtualCEPCI / CEPCI.year2017
* (173.0E6 / EcoPar.ExchangeRate) * 'US$'
* (abs( AnhyEthProd * EcoPar.WorkedHours / (340E3 * 'm^3'))^0.6);

CHPCost = 1 #fator de instalacao
* AtualCEPCI / CEPCI.year2017
* (140.0E6 / EcoPar.ExchangeRate) * 'US$'
* (abs((BLR402.Steam.Fw)/(200000 * 'kg/h'))^0.6);

ADCCost = 1.2 #fator de instalacao
* AtualCEPCI / CEPCI.year2017
* (5.4370E6) * 'US$'
* (abs((COL303.Vinasse.Total.Fw)/(9207 * 't/d'))^0.6);

```

Fonte: Os autores, 2022.

4.5.4 Cálculo do VPL

A simulação utilizada da planta da biorrefinaria já possuía de forma integrada o cálculo do valor presente líquido (VPL), ou seja, conforme foram sendo preenchidos os dados da simulação o resultado do VPL foi gerado automaticamente pelo software.

Deste modo, os valores resultantes do software foram comparados e analisados para constatar qual caso, com ou sem DA, possuiria o melhor VPL, sendo assim, o investimento mais rentável.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação de uma destilaria autônoma típica brasileira, que tem capacidade para processar 4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano (aproximadamente 833 ton/h). Essa usina produz cerca de 89,80 litros/TC (toneladas de cana-de-açúcar) de etanol anidro e opera durante 240 dias/ano com 87,5% de tempo útil.

Essas premissas foram utilizadas para ambos os estudos de caso, sem e com implementação de biodigestão. A produção simulada de etanol foi comparada com outras unidades autônomas que existem no Brasil, trabalhos como a de Junqueira *et al* (2017) os quais desenvolveram uma biorrefinaria virtual de cana de açúcar para avaliar os impactos ambientais e econômicos apresentou uma taxa média de produção de 85,2 litros/TC, valor próximo ao simulado.

A unidade de biodigestão da vinhaça foi integrada para o caso base descrito anteriormente (unidade autônoma 1G) para avaliar o impacto da produção de biogás. As características físicas e químicas da vinhaça gerada após a etapa de purificação do etanol (E303-E304), que é enviada para a unidade de DA, podem variar significativamente, dependendo do cultivo da cana-de-açúcar (solo, insumos agrícolas, métodos de colheita) e das condições operacionais industriais (tipo de mosto, rendimento da fermentação, eficiência da destilação, entre outras). Na seção de caracterização da vinhaça são apresentados os dados médios das principais características da vinhaça.

Na Tabela 9 são apresentados os principais dados operacionais da simulação e os resultados obtidos para o estudo com e sem DA. O valor da taxa de produção de biogás e custo operacional foi estimado de acordo com o estudo do Fuess e colaboradores (2017).

Tabela 9. Principais resultados obtidos nas simulações da biorrefinaria, incluindo a biodigestão da vinhaça.

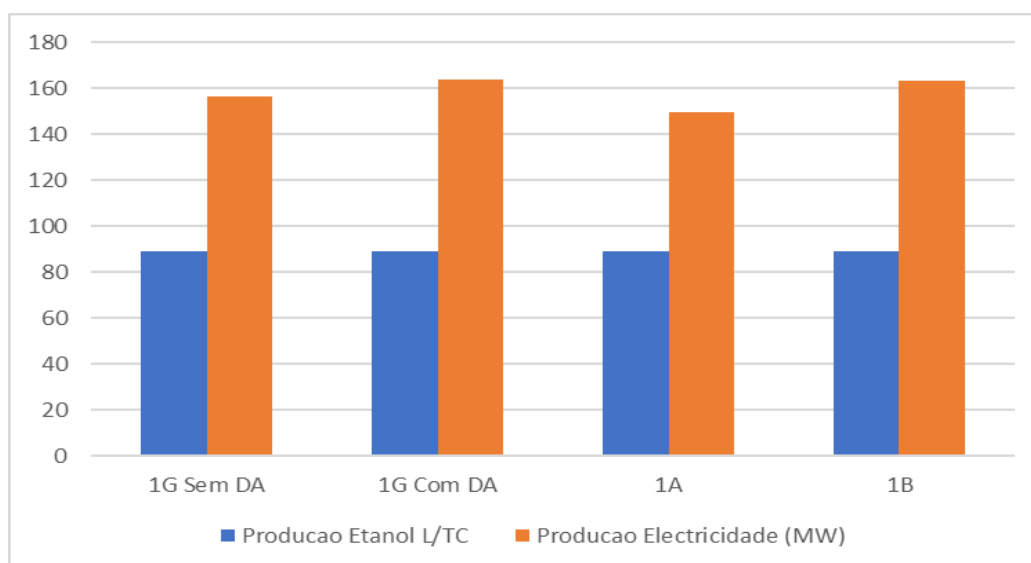
| Parâmetro | Unidade | Sem DA | Com DA | Referência |
|-------------------------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|
| Produção de Etanol Anidro | m ³ /h | 74,84 | 74,84 | Valor simulado |
| Produção específica de etanol | L/TC | 89,80 | 89,80 | Valor simulado |
| Produção de vinhaça | m ³ /h | 681,67 | 681,67 | Valor simulado |

| | | | | |
|--|---------------------------------|--------|--------|------------------------------|
| Produção específica de vinhaça | L et/L vin | 9,10 | 9,10 | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Taxa de biogás de vinhaça | Nm ³ /d | - | 9207,1 | Fuess <i>et al.</i> (2017) |
| Produção específica de biogás vinhaça (volume de biogás por volume de vinhaça) | Nm ³ /m ³ | - | 5,05 | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| DQO da vinhaça | kg DQO/m ³ | - | 16,76 | Longati <i>et al.</i> (2018) |
| Produção de eletricidade excedente | MW | 156,37 | 163,74 | Valor Simulado |

Fonte: Autores 2022.

Com base nos dados da Tabela 9, pode-se observar que a simulação com a unidade de biodigestão anaeróbia obteve um aumento de 4,71% na produção de energia excedente em relação à simulação sem DA, pois o biogás gerado pelo sistema de biodigestão foi queimado nas caldeiras do setor de co-geração para produção de energia. O valor obtido de energia elétrica excedente pode ser comparado ao trabalho de Longati *et al.* (2019), onde ela estuda a quantidade de produção de energia e biogás para cenários em uma unidade industrial autônoma que é implementada em sistemas 1G sem biodigestão (1A) com biodigestão (1B). Os dados obtidos na simulação e pelos autores são comparados na Figura 9.

Figura 9. Principais resultados obtidos em simulações com e sem DA e comparados com o trabalho de Longati *et al.* 2019.



Fonte: Os autores, 2022.

Comparando o processo estudado (1G) observa-se que Longati e colaboradores (2019) obtiveram produções de energia elétrica excedente entre 150 e 165 MW para uma destilaria autônoma 1G sem e com biodigestão, respectivamente (cerca de 9% de aumento). Isto em razão ao fato de que o processo tem uma maior taxa de produção de biogás (3045,1 Nm³/h) em relação ao caso de estudo adotado (383,62 Nm³/h), o qual foi assumido com base em Fuess *et al.* (2017).

5.1 ANÁLISE DE CBIOS

Com base nos parâmetros coletados da fase agrícola da RenovaCalc apresentados na Tabela 8, foi calculada a intensidade de carbono da fase industrial, fase de transporte e fase de uso. Uma vez estimado este valor, foi possível determinar a nota de eficiência energética da unidade de produção e a quantidade de CBIOS produzida. A Tabela 10 mostra os valores da nota de eficiência e CBIOS produzidos para a unidade com e sem DA.

Tabela 10. Resultados dos CBIOS produzidos do estudo de caso de base.

| Parâmetro | Unidade | Sem DA | Com DA |
|---------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Emissão agrícola | g CO ₂ eq/MJ | 14,28 | 14,28 |
| Emissão industrial | g CO ₂ eq/MJ | 14,54 | 14,21 |
| Emissão uso | g CO ₂ eq/MJ | 0,43 | 0,43 |
| Emissão transporte | g CO ₂ eq/MJ | 0,80 | 0,80 |
| Intensidade carbono | g CO ₂ eq/MJ | 30,06 | 29,73 |
| Nota eficiência | g CO ₂ eq/MJ | 57,33 | 57,66 |
| CBIOS | ton/h | 94,36 | 94,91 |

Fonte: Autores 2022.

A partir dos dados simulados foi possível observar um pequeno aumento na produção de CBIOS para o estudo de caso com a unidade DA em cerca de 0,55 ton/h proveniente da diminuição de g CO₂ eq devido ao uso da vinhaça biodigerida para a produção de biogás na fase industrial. Os casos simulados contêm os mesmos parâmetros de entrada, no entanto, as diferenças observadas em seus impactos ao meio ambiente devem-se à eletricidade que é produzida pelo biogás queimado na caldeira. Isso significa que mais energia é gerada a partir da quantidade de cana processada.

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Foi realizada uma análise econômica para verificar a viabilidade da unidade industrial com e sem a implementação da biodigestão da vinhaça. Algumas considerações importantes foram feitas em relação ao processo de produção de etanol e biogás como um todo, utilizando informações de vários autores estudados sobre a abordagem econômica do processo, tais como Fuess *et al.* (2017), Longati *et al.* (2018) e Nogueira *et al.* (2015). A Tabela 11 apresenta a estruturação dos custos de equipamentos para o processo simulado. Os valores obtidos são ajustados pela aplicação da relação direta entre o índice CEPCI 2021/2017.

Tabela 11. Resultados do investimento industrial dos equipamentos para o estudo de caso de base.

| Parâmetro | Sem DA (USD) | Com DA (USD) |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Custo setor de recepção e extração | 33.149.550,00 | 33.149.550,00 |
| Custo setor de evaporação | 1.332.450,00 | 1.332.450,00 |
| Custo setor de fermentação, destilação e desidratação | 42.616.700,00 | 42.616.700,00 |
| Custo setor de calor e energia elétrica (cogeração) | 73.546.500,00 | 75.106.700,00 |
| Custo setor de digestão anaeróbia | 0,00 | 11.536.600,00 |
| Custo Total Investimento Equipamentos (USD) | 150.645.000,00 | 163.742.000,00 |

Fonte: Autores 2022.

Com base nos dados obtidos na tabela 11, observa-se um aumento no custo do setor de calor e de energia elétrica no caso da unidade com DA é devido à queima do biogás gerado no sistema de cogeração. Deve-se ressaltar que o custo do setor DA teve um impacto de 7,05% em relação ao custo total de investimento do equipamento. Além disso, para ambos os estudos de caso, o custo de investimento mais influente é a cogeração, que representa cerca de 40% do custo total de investimento para os equipamentos.

Em relação à avaliação dos custos operacionais, foram utilizados os valores de referência expostos por Longati *et al.* (2018). A Tabela 12 apresenta os valores obtidos da simulação onde os custos de manufatura são estimados através das despesas com serviços públicos, mão-de-obra, equipamentos de laboratório e matérias-primas. Os custos fixos são representados pela depreciação e manutenção anual. Os custos gerais cobrem os

custos de administração da empresa que são estimados através de custos administrativos, marketing, pesquisa e desenvolvimento.

Tabela 12. Resultados do custo operacional para o estudo de caso de base.

| Parâmetro | Sem DA (USD/ano) | Com DA (USD/ano) |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Custos de manufatura | 107.493.000,00 | 107.972.000,00 |
| Custo fixos | 21.750.900,00 | 23.641.900,00 |
| Gastos gerais | 1.328.600,00 | 1.392.100,00 |
| Total (OPEX) | 130.573.000,00 | 133.006.000,00 |

Fonte: Autores 2022.

Conforme os valores obtidos na Tabela 12, os custos operacionais da unidade com DA tiveram um aumento de 1,86% em comparação com a unidade sem. Os maiores impactos são gerados nos custos fixos devido ao aumento na manutenção e depreciação anual. Para a análise do investimento, foram utilizadas algumas das correlações onde o investimento direto e indireto pode ser expresso como uma função do valor de compra do equipamento. O investimento total estimado do projeto está descrito na Tabela 13. Verifica-se um aumento de 8,69 % no custo total do investimento quando a biodigestão é incorporada ao processo.

Tabela 13. Resultados do investimento total para o estudo de caso de base.

| Parâmetro | Sem DA (USD) | Com DA (USD) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| I _{direita} | 150.645.000,00 | 163.742.000,00 |
| I _{indireta} | 11.675.000,00 | 12.690.000,00 |
| I _{giro} | 16.232.000,00 | 17.643.200,00 |
| Total (Capex) | 178.552.000,00 | 194.075.000,00 |

Fonte: Autores 2022.

Desta maneira, o VPL do investimento para ambos os cenários foi determinado pela soma de todos os fluxos de caixa da empresa, considerando seu valor no período inicial (ano zero). O VPL é útil para determinar se um determinado investimento ou projeto oferece uma boa relação custo-benefício, assim, o VPL mede o excedente ou déficit correspondente aos fluxos de caixa em termos de seus valores atuais. A Tabela 14 contém o VPL simulado para os cenários de estudo.

Tabela 14. Resultados do valor presente líquido para o estudo de caso de base.

| Parâmetro | Sem DA (USD) | Com DA (USD) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|
| VPL | 207.651.000,00 | 190.878.000,00 |

Fonte: Autores 2022.

Observa-se que para ambos os casos foi obtido um VPL positivo ($VPL > 0$) que indica que o investimento é economicamente viável e deve ser considerado como uma alternativa de investimento.

Levando em consideração que a unidade industrial autônoma sem biodigestão apresentou um índice maior e conseqüentemente um melhor retorno financeiro, essa se mostra como a opção mais atrativa de investimento. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto do preço de venda CBIOS e do preço de venda de eletricidade sobre o VPL em ambos os cenários.

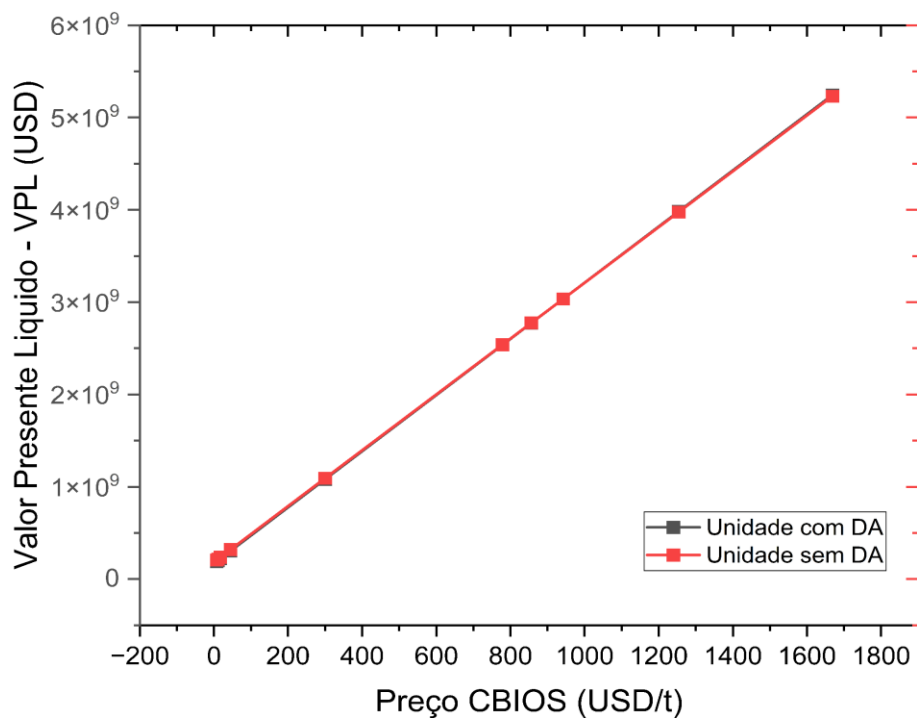
Os preços de venda de CBIOS e eletricidade variaram em cerca de 10% de seu preço atual para cada interação. A Figura 10(A) contém a análise de sensibilidade para o preço de venda de CBIOS versus VPL mantendo constante o preço de venda de eletricidade e os custos de investimento. A Figura 11(A) mostra a análise de sensibilidade para o preço de venda de eletricidade versus VPL quando os custos de investimento e o preço de CBIOS permanecem inalterados. Além disso, foi realizada uma comparação entre as VPLs para cada estudo de caso. A Figura 10(B) mostra a diferença entre as VPL obtidas versus o preço CBIOS, o mesmo cenário foi executado para o caso do preço da eletricidade Figura 11(B).

Uma análise geral da Figura 10(A) indica que a variação do preço do CBIOS influencia a VPL para o processo com e sem DA. Pode-se observar que em todos os cenários simulados se obtém um VPL positivo e, o cenário para a simulação sem DA é mais sensível à variação do preço de venda do CBIOS já que reduz drasticamente o VPL. No início da simulação, a implementação sem DA tem uma VPL maior em comparação com a simulação com DA de cerca de 8,8%, o que a torna um processo viável.

Com base no observado na Figura 10(B) há um ponto de quebra quando o preço de venda do CBIOS excede 958,64 USD/t (valor 131,44 vezes maior que o preço de venda inicial). Neste contexto o VPL da simulação com DA começa a exceder o valor do VPL

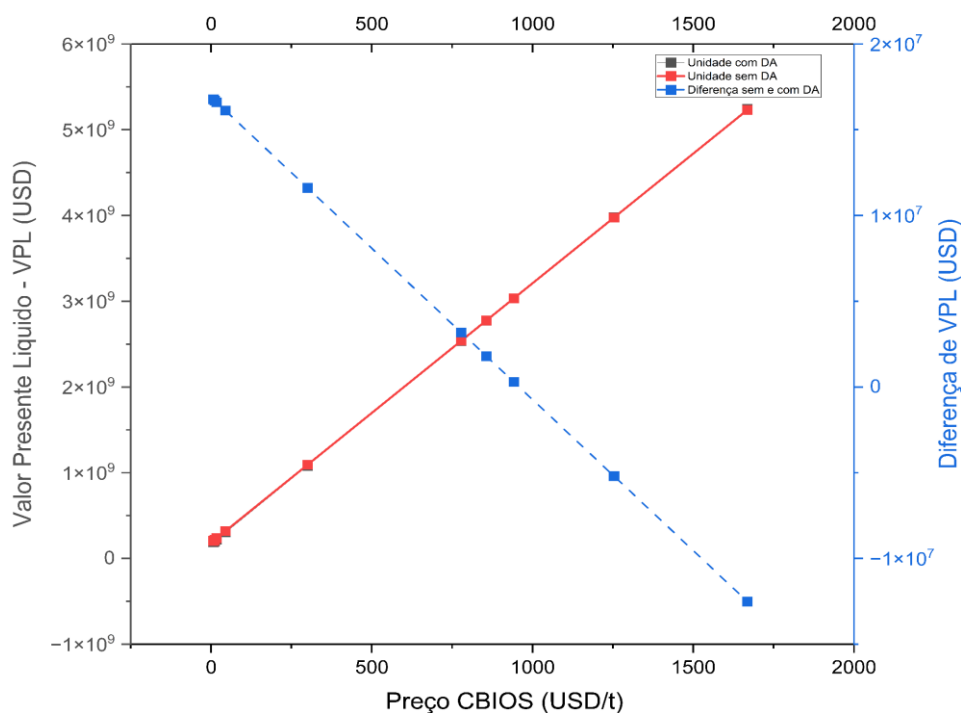
sem DA. Desta forma, para este cenário, a viabilidade do processo passa favorecer a simulação com DA.

Figura 10(A). Resultados para a análise de sensibilidade: Valor Presente Líquido (VPL) em função da variação do preço de venda de CBIOS.



Fonte: Autores 2022.

Figura 10(B). Comparação dos VPLs obtidos em função da variação do preço de venda de CBIOS.



Fonte: Autores 2022.

A Figura 11(A) mostra que o preço de venda de eletricidade tem maior influência na viabilidade de ambos cenários, especialmente para a simulação com DA, isto porque para este cenário é produzida eletricidade adicional a partir do biogás da vinhaça.

É possível observar com base na Figura 11(B) que a diferença dos VPLs obtidos atinge rapidamente o ponto de ruptura, quando o preço de venda da eletricidade é superior de 117,94 USD/MWh (valor 2,60 vezes superior ao preço de venda inicial), favorecendo a viabilidade da simulação com a unidade com DA.

É importante notar que, embora o processo 1G com DA inicialmente represente viabilidade menor em comparação com o processo sem DA, as análises de sensibilidade mostraram que a viabilidade do processo DA está próximo de ser alcançada, indicando que a biodigestão é uma tecnologia que deve ser considerada como um investimento.

Figura 11(A). Resultados para a análise de sensibilidade: Valor Presente Líquido (VPL) em função da variação do preço de venda de eletricidade.

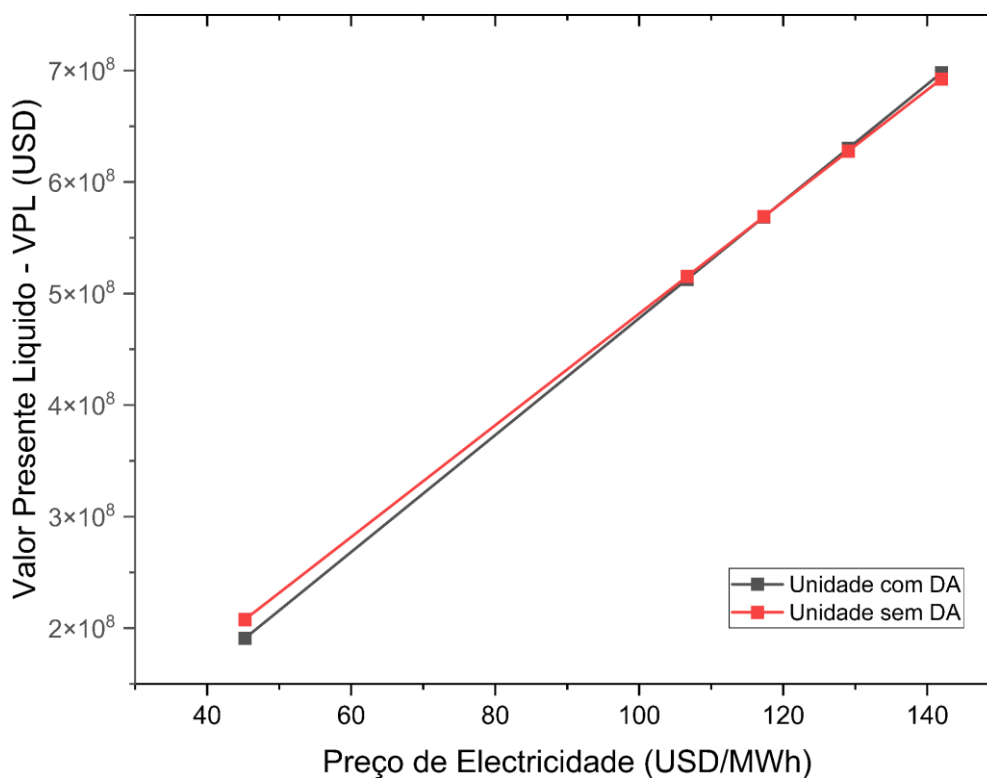
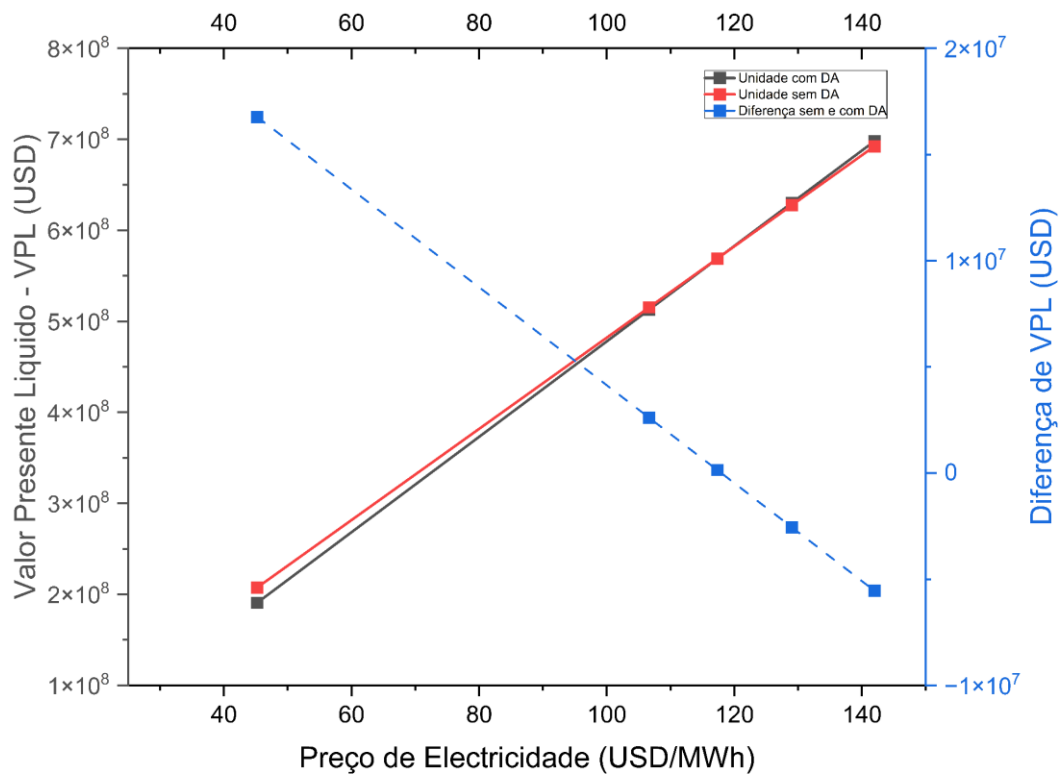


Figura 11(B). Comparação dos VPLs obtidos em função da variação do preço de venda de eletricidade.



Fonte: Autores 2022.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os estudos analisados, concluiu-se que a unidade industrial implementada com o processo DA mostrou um aumento na produção de energia devido à queima de biogás no sistema de co-geração. Este aumento está de acordo com o encontrado na literatura, cerca de 4 a 9%.

Na análise ambiental, os resultados mostraram que a tecnologia do biogás tem o potencial de aumentar o CBIOS produzido e é também uma alternativa para a reutilização de um subproduto que tem um alto impacto ao meio ambiente.

Em relação à análise econômica, as maiores estimativas de investimento foram observadas para os cenários onde a unidade com DA foi utilizada, devido ao aumento dos custos na implementação da parte de co-geração e biodigestão. Para o estudo de ambos os casos foram obtidos um VPL positivo, onde inicialmente a execução sem DA apresentou um VPL maior (+207,651 milhões de dólares).

Para o processo sem DA, conforme a análise de sensibilidade foi aplicada, houve uma diminuição do VPL para cada influência do preço de venda do CBIOS e da eletricidade em relação ao VPL do estudo com DA. Para a unidade com biodigestão observou-se que o preço do CBIOS quando excede 958,64 USD/ton, há um VPL maior em comparação com a unidade sem DA. Este mesmo fato se aplica quando o preço de venda de eletricidade é superior a 117,94 USD/MWh.

Consequentemente, o caso estudado com DA precisa que o preço do CBIOS ou a eletricidade excedam os valores encontrados para se tornar um investimento mais rentável que o caso sem DA. Sendo assim, a simulação analisada sem o processo de biodigestão é economicamente mais viável do que o processo com DA.

Para projetos futuros é essencial realizar um estudo de mercado mais aprofundado a fim de estabelecer preços com maior precisão e permitir uma análise mais específica dos processos, plantas de produção, produto final, entre outros. Adicionalmente, realizar uma análise para estudar o impacto ambiental da vinhaça sem o processo de biodigestão e, uma segunda verificação mediante o processo de DA, com a finalidade de identificar a redução dos impactos ambientais pelo uso do subproduto como fertilizante e as emissões de CO₂ geradas.

REFERÊNCIAS

ABARCA, C. D. G. **Inovações tecnológicas na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro; Ouro Preto: DEPRO, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

ALBARELLI, J. Q. **Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica**. 2013. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo. 2019.

ANP. **Certificados da Produção ou Importação Eficiente de Biocombustíveis**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021f. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/certificacoes/certificados-aprovados-producao.xlsx>>. Acesso em: 22 mai. 2022

ANP. **Consulta e Audiência Públicas nº 7/2019**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 16 Abril 2019d. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/consultas-audienciaspublicas/concluidas/5070-consulta-e-audiencia-publicas-n-7-2019>>. Acesso em: 17 mai. 2022.

ANP. **RenovaBio - Política Nacional de Biocombustíveis**. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 09 Julho 2019f. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

ANP. RESOLUÇÃO Nº 758, DE 23 DE NOVEMBRO DE 2018. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, 2018. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/52003440/do1-2018-11-27-resolucao-n-758-de-23-denovembro-de-2018-52003305?utm_source=Comece+seu+dia+beminformado&utm_campaign=f8bdc0a5ee-newsletter-2018_11_27&utm_medium=email&utm_te>. Acesso em: 16 jul. 2022.

ANP. RESOLUÇÃO ANP Nº 791, DE 12.6.2019. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO - DOU**, 14 Junho 2019b. 44.

ANP. RESOLUÇÃO Nº 802, DE 5 DE DEZEMBRO DE 2019. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, Brasília, 06 Dezembro 2019o. 121. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-802-de-5-de-dezembro-de-2019-231852634>>. Acesso em: 18 mai. 2022.

ANSANELLI, S. L. M.; SENNA, P. P.; RIBEIRO, G.; CAMPOS, D. A. C. **Sistemas de inovação ambiental em países em desenvolvimento: uma discussão a partir do desenvolvimento do etanol de segunda geração no Brasil**. In: Anais do XXI Encontro Nacional de Economia Política. UFABC – São Bernardo do Campo, junho de 2016.

AZAPAGIC, Adisa. **Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation**. Chemical Engineering Journal, v. 73, n. 1, p. 1–21, 1999.

BRASIL. LEI Nº 13.576, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.**, Brasília, DF, n. Publicado no Diário Oficial da União de 27.12.2017, Dez 2017.

BRASIL. **PRETENDIDA CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA PARA CONSECUÇÃO DO OBJETIVO DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA**, Brasília, 2015. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRASIL_iNDC_portugues.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BRINKMAN, M. L. J. *et al.* **Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol production in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. 347-362. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044155134&doi=10.1016%2fj.rser.2018.02.014&partnerID=40&md5=b6bec4fbbdc7c902683aeb74b5af8887>>.

BENITES-LAZARO, L.L.; MELLO-THÉRY, N.A.; LAHSEN, M. **Business storytelling about energy and climate change: The case of Brazil's ethanol industry**. Energy Research & Social Science, v. 31, p. 77–85, 2017.

BONOMI, A. *et al.* **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB): 2011 Report**. Campinas, Sao Paulo: Brazilian Bioethanol Science and Technology Laboratory (CTBE), Technological Assessment Program (PAT), Internal Report, 2012.

CARDOSO, Leonardo C.B. *et al.* **Biofuels policies and fuel demand elasticities in Brazil**. Energy Policy, v. 128, p. 296–305, 2019.

CESNIK, Roberto. **Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil**. 2007.

CNI. **O setor sucroenergético em 2030 - dimensões, investimentos e uma agenda estratégica**. Brasília. 2017.

CARVALHO, M. L. *et al.* **Kinetic study of the enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 30, n. 3, p. 437–447, 2013.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CHERUBINI, F. **The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals.** *Energy Conversion and Management*. v. 51, p. 1412–1421, 2010.

CLAUDINO, S.; TALAMINI, E. **Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.17, n.1, p.77–85, 2013

CNPE. RESOLUÇÃO No 15, DE 24 DE JUNHO DE 2019 - Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO de 9.07.2018**, Brasília, DF, 09 de Julho 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/despachos-do-presidente-da-republica-190107850>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

CNPE. RESOLUÇÃO No 5, DE 5 DE JUNHO DE 2018 - Estabelece as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. **D.O.U. de 6.6.2018**, Brasília, DF, 6 Junho 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/71068545/Resolu%C3%A7%C3%A3o+n%C2%BA+5_2018_CNPE.PDF/a46326ab-df5d-4d3f-ad52-b9f1ffc7ab1d>. Acesso em: 30 mai. 2022.

CNPE. RESOLUÇÃO Nº 8, DE 18 DE AGOSTO DE 2020. **CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA - CNPE, BRASÍLIA - DF, 18 AGOSTO 2020.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36074/1045888/Resolu%C3%A7%C3%A3o_8_CNPE_Metas_Compuls%C3%B3rias.pdf/cf41e0db-3868-2460-48a7-501f1a40ccc7>. Acesso em: Acesso em: 27 jul. 2022.

COLARES, Juscelino F. **A brief history of Brazilian biofuels legislation.** *Syracuse J. Int'l L. & Com.*, 2007, vol. 35, p. 293.

CASTANÓN, N.J.B., (2002), **Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais.** Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CAVALETT, O. *et al.* **Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil.** *Clean Technologies and Environmental Policy*, v.14, p. 399–410, 2012.

CHAGAS, M. F., BONOMI, A.; CVALETT, O. **Ethanol Life Cycle Inventory version 2015.** http://8k5sc3kntvi25pnsk2f69jf1.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2016/08/MeT-07-2012_Atualizacao-2015.pdf (Accessed May.5.17).

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa, *et al.* **Biodigestão de efluentes. Biomassa para energia.** Campinas: Editora da UNICAMP. cap, 2007, vol. 15, p. 493-529.

DA SILVA, Mellissa AS; GRIEBELER, Nori P.; BORGES, Lino C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 108-114, 2007.

DE FREITAS, Luciano Charlita; KANEKO, Shinji. **Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil.** *Energy Economics*, v. 33, n. 6, p. 1146–1154, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014098831100079X>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

DE HAES, Helias A. Udo *et al.*. **Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 4, n. 2, 1999

DE MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias, and David Zilberman. **Production of ethanol from sugarcane in Brazil: from State intervention to a Free Market.** Vol. 43. Springer Science & Business Media, 2014.

DIAS, M. O. S. *et al.* **Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems.** *Energy*, v.26, p. 3691-3703, 2011.

DU, C. *et al.* **Life cycle assessment addressing health effects of particulate matter of mechanical versus manual sugarcane harvesting in Brazil.** 2017.

EIA. **The United States exported a record volume of ethanol in 2018 for second consecutive year.** *Today in Energy*, Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=39212>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

EMBRAPA AGROENERGIA. **Biorrefinarias.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48750/1/biorrefinaria-modificado-web.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

EPBR. **Aumento da mistura de biodiesel e dos estoques de diesel em discussão.** Disponível em: <<https://epbr.com.br/aumento-da-mistura-de-biodiesel-e-dos-estoques-de-diesel-em-discussao/#:~:text=%E2%80%9420percentual%20de%20adi%C3%A7%C3%A3o%20do,10%25%20desde%20o%20ano%20passado.>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

FERNANDES, Isla, **Cana-de-açúcar: a Cultura que Potencializou o Brasil!** AgroPós, Agropos.com.br, disponível em: <<https://agropos.com.br/cana-de-acucar>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. **Digestão anaeróbia da vinhaça da cana-de-açúcar em reator acidogênico de leito fixo seguido de reator metanogênico de manta de lodo.** 2013. 162 p. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos. 2013.

FUESS. Lucas Tadeu *et al.* **Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: How phase separation and alkalization**

impact biogas and electricity production costs. Chemical Engineering Research and Design, v. 119, p. 209–220, 2017.

FUESS, Lucas Tadeu *et al.* **Diversifying the technological strategies for recovering bioenergy from the two-phase anaerobic digestion of sugarcane vinasse: An integrated techno-economic and environmental approach.** Renewable Energy, v. 122, p. 674–687, 2018.

FREIRE, W. J.; Cortez, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar.** Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

FRISCHKNECHT, Rolf. **Life cycle inventory modelling in the Swiss national database ECOINVENT 2000,** In: Sustainability in the Information Society (Proceedings). In 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection. ETH, Zürich, pp. 699 - 708.. Disponível em: <<http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol104/0699.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

GEMTOS, T.A.; CHOULIARAS, N.; MARAKIS, St., Vinasse Rate, Time of Application and Compaction Effect on Soil Properties and Durum Wheat Crop, **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73, n. 3, p. 283–296, 1999.

GOEDKOOP, M., OELE, M. **Introduction to LCA with SimaPro.** Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/legacy/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>>.

GRANGEIA, Carolina; SANTOS, Luan; LAZARO, Lira Luz Benites. **The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects.** Energy Conversion and Management: X, v. 13, p. 100156, 2022.

GRASSI, M.C.B.; PEREIRA, G.A.G. **Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels.** Industrial Crops and Products, v. 129, p. 201–205, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669018310586>>. Acesso em: 13 ago. 2022

GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo *et al.*, **Application of life cycle assessment to the structural optimization of process flowsheets.** Industrial & Engineering Chemistry Research, 47, 777-789.

GUINÉE, Jeroen; HEIJUNGS, Reinout. **A proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products,** Chemosphere, v. 26, n. 10, p. 1925–1944, 1993.

GUINÉE, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Gjalt, H., RenéKleijn, Koning, A. de., Owers, L. van, Sleswijk, A.W., Sangwon, S., Haes, H.A.U. de., **Handbook on life cycle assessment.** Operational guide to the ISO standards, 2002.

HAVARD BUSINESS REVIEW. **A Refresher on Net Present Value (2014).** Disponível em: <<https://hbr.org/2014/11/a-refresher-on-net-present-value>>. Acesso em: 7 dez. 2022.

INVESTNEWS. **CAPEX e OPEX: o que são e como analisar esses custos?** Disponível em: <https://investnews.com.br/guias/capex-e-opex/?gclid=CjwKCAiAp7GcBhA0EiwA9U0mtlImHzAhf8VkCJA3t6TX9N9Qmj6QthK4VwVKcZmYZ4zsBD2Q6bODXR0Cfn4QAvD_BwE>. Acesso em: 4 nov. 2022.

ISO 14040 (1997). **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework**. The International Organization for Standardization.

ISO 14040 (2006). **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. The International Organization for Standardization.

ISO 14041 (1998). **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Life Cycle Inventory Analysis**. The International Organization for Standardization.

ISO 14042 (2000). **Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment**. The International Organization for Standardization.

ISO 14043 (2000). **Environmental Management Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation**. The International Organization for Standardization.

ISO 14044 (2006). **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. The International Organization for Standardization.

JÚNIOR, Antônio Djalma Nunes Ferraz *et al.* **Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse**. *Renewable Energy*, v. 89, p. 245-252, 2016

JUNQUEIRA, Tassia L.; CHAGAS, Mateus F.; GOUVEIA, Vera L. R.; *et al.* **Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons**. *Biotechnology for Biofuels*, v. 10, n. 1, 2017.

JONG, E. DE *et al.* **Bio-Based Chemicals - A 2020 Update**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/Bio-based-chemicals-a-2020-update-final-200213.pdf>>. Acesso em: 6 dez. 2022.

KAPARAJU. Prasad; SERRANO. María; ANGELIDAKI. Irini. **Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor**. *Applied Energy*. v. 87. n. 12. p. 3779–3783. 2010.

KUNZ, Airton *et al.*, (ed.). **FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA, PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS, USO E TRATAMENTO DO DIGESTATO**. 1. ed. Concórdia, SC: [s. n.], 2019. 2011 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1108617/fundamentos-da-digestao-anaerobia-purificacao-do-biogas-uso-e-tratamento-do-digestato>. Acesso em: 16 ago. 2022.

LYRA, Marília R.C.C.; ROLIM, Mário M.; SILVA, José A. A da, **Toposseqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 525–532, 2003.

LONGATI, ANDREZA APARECIDA, **Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol**. Ufscar.br, 2018.

LONGATI, A. A.; CRUZ, A. J. G. **Modelling, simulation and economic analysis of the vinasse anaerobic digestion in a sugarcane biorefinery. Environments: technoscience and its relation to sustainability, ethics, aesthetics, health and the human future**. EdUFSCar, São Carlos, p. 189-202, 2018.

LONGATI, Andreza A. *et al.* **Biogas production from anaerobic digestion of vinasse in sugarcane biorefinery: a techno-economic and environmental analysis**. Waste and Biomass Valorization, v. 11, n. 9, p. 4573-4591, 2019.

MACEDO I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. **Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020**. Biomass and Bioenergy, v.32, p. 582-595, 2008.

MAPA. **Anuaário estatístico de agroenergia 2012**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília. 2013. (ISBN 978-85-7991-070-8).

MARAFON, Anderson Carlos *et al.*, **Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production**. Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives, p. 179–194, 2020.

MATSUURA, M. I. *et al.* **NOTA TÉCNICA RenovaCalc MD: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio**. [S.l.]. 2018.

MATSUURA, M. I. D. S. F. *et al.* **RENOVACALC: A CALCULADORA DO PROGRAMA RENOVABIOEMBRAPA**. [s.l.: s.n.]. 2018. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/196899/1/Marilia-renovacalc.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2022.

MEDINA, J. **Cana-de-açúcar: a Cultura que Potencializou o Brasil! | AgroPós**. Disponível em: <<https://agropos.com.br/cana-de-acucar/>>. Acesso em: 6 jun. 2022.

MENDONÇA, J. F.; JUNIOR, I. C. L. **Comparação dos Custos de Produção e Transporte de Etanol entre Brasil e Estados Unidos**. SEGrT. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos10/272_ETANOL%20BR%20X%20EUA%20SEGET2010%20rev01.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2022.

MILANEZ, A. Y. *et al.* **De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública**. BNDES Setorial, 41. Rio de Janeiro: BNDES, março de 2015.

MME. Ministério de Minas e Energia. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, BRASÍLIA - DF**, 1, 21 Novembro 2019. 64. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-419-de-20-de-novembro-de-2019-228863910>>. Acesso em: 11 mai. 2022.

MME. Nota Explicativa sobre a Proposta de Criação da Política Nacional de Biocombustíveis. **MME - APRESENTAÇÕES RENOVABIO, 2017**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/legislacao-e-documentos/concepcao-do-renovabio/renovabionotaexplicativa.pdf/view>>. Acesso em: 18 mai. 2022.

MME. PORTARIA Nº 419, DE 20 DE NOVEMBRO DE 2019. **DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO**, Seção: 1, 2019b. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-419-de-20-denovembro-de-2019-228863910>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

MME. RenovaBio. **O que é o RenovaBio?**, 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/0/P%26R++RenovaBio.pdf/a29044a3-6315-4845-80d8-832852efbb7f>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. **Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 888–903, 2015.

MUNROE, JH. Fermentation. In: HARDWICK, W.A. **Handbook of brewing**. New York: Marcel Dekker. p.323-353,1994.

NAZATO *et al.* **Moenda x difusor: diferentes pontos de vista sobre o assunto**. *Bioenergia em revista*. v. 1, n. 1, 2011.

NOVACANA. **CNPE confirma redução de meta do RenovaBio em 2020 para 14,53 milhões de CBios**. Novacana.com. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/meio-ambiente/cnpe-confirma-reducao-meta-renovabio-2020-14-53-milhoes-cbios-100920>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

NUNES, J. O. S. *et al.* **APROVEITAMENTO DE MELAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DA TORTA DE FILTRO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS, EM REATORES ANAERÓBIOS DE FLUXO ASCENDENTE COM MANTA DE LODO, EM SÉRIE**. Disponível em: <<https://citec.fatecjab.edu.br/index.php/citec/article/view/111/174>>. Acesso em: out. 2022.

OLIVEIRA, C.M. **Integração energética da biorrefinaria de cana-de-açúcar para produção de etanol de primeira e segunda geração e energia elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), UFSCar, São Carlos, 2014.

PACHECO, T. **A Importância da Produção de Etanol**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/886571/1/CITE04.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

PENNINGTON, D.W.; POTTING, J.; FINNVEDEN, G.; *et al.* Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 721–739, 2004.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. **Plant design and economics for chemical engineers**. New York: McGraw-Hill, 1991.

PRADO, R. DE M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. **Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture**. Applied and Environmental Soil Science, v. 2013, p. 1–8, 2013.

PROJETO E PESQUISA EM ENGENHARIA QUÍMICA (PROPEQ). **Viabilidade econômica do aumento de uma produção industrial**. Disponível em: <<https://propeq.com/viabilidade-economica-do-aumento-de-uma-producao-industrial/>>. Acesso em: 4 nov. 2022.

QUEVEDO DE LIMA, H. **O que é o crédito de descarbonização CBIO?** Disponível em: <<https://energiaebiogas.com.br/o-que-e-o-credito-de-descarbonizacao-cbio/>>. Acesso em: 25 nov. 2022.

RABELO, Sarita Cândida; DA COSTA, Aline Carvalho; VAZ ROSSEL, Carlos Eduardo. **Industrial Waste Recovery**. Sugarcane, p. 365–381, 2015.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; *et al.* **Life cycle assessment**. Environment International, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

RFA. **Annual Ethanol Production** | Renewable Fuels Association. Renewable Fuels Association, 2020. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

RIBEIRO, F. F. **Produção de biogás a partir de hidrolisados gerados no pré-tratamento por auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2016.

ROCHA, Mateus Henrique. **Uso da análise do ciclo de vida para a comparação do desempenho ambiental de quatro alternativas para tratamento da vinhaça**. Unifei.edu.br, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1583>>. Acesso em: 27 out. 2022.

ROCHA, G. G.J.M. *et al.* **Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production**. Industrial Crops and Products. v. 35, p. 274-279, 2012.

ROSSETTO, A. J. **Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. In: Paranhos, S.B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas:Fundação Cargill, 1987, v.2, p.435-504.

RODRIGUES, F. **CNPE publica resolução que atualiza metas do RenovaBio até 2029**. novacana.com, 10 Julho 2019. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/mercado/regulacao/cnpe-publica-resolucao-atualiza-metas-renovabio-2029-100719>> Acesso em: 04 ago. 2022.

ROY, Poritosh *et al.*. **A review of life cycle assessment (LCA) on some food products**. Journal of Food Engineering, v. 90, n. 1, p. 1–10, 2009.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. 2007. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SEABRA J. E. A.; MACEDO. I. C. **Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil**. Energy Policy v. 39, p.421–428, 2011(b). doi: 10.1016/j.enpol.2010.10.019 .

SERPRO. **Plataforma CBIO**. SERPRO, 2020. Disponível em: <<https://www.loja.serpro.gov.br/plataformacbio>>. Acesso em: 13 ago. 2022.

SENNA, Pedro Pinho; DE MATTOS ANSANELLI, Stela Luiza. **Etanol de primeira ou de segunda geração? Uma comparação entre os ciclos produtivos**. Blucher Engineering Proceedings, v. 3, n. 4, p. 1497-1510, 2016.

SILVA, M. L. B. da; CANTAO, M. E.; MEZZARI, M. P.; MA, J.; NOSSA, C. W. **Assessment of Bacterial and Archaeal Community Structure in Swine Wastewater Treatment Processes**. Microbial Ecology, Netherlands, v. 86, p. 106-112, 2014.

SILVA, João Paulo Nunes da; SILVA, Maria Regina Nunes da. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. 2016.

SILVEIRA, Evanildo da. **Vinhaça para gerar energia**. Revista Pesquisa FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), São Paulo, Edição 238, Dezembro 2015, pág. 68. Disponível em:<http://revistapesquisa.fapesp.br/wpcontent/uploads/2015/12/068-071_Vinhaca_238.pdf> Acesso em: 20 abr. 2021.

SOARES, R. P., & SECCHI, A. R. **EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation**. Computer Aided Chemical Engineering, v. 14, p.947–952, 2003.

SOUZA, R. B. **Pré-tratamento hidrotérmico e hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2016.

STATTMAN, Sarah L.; HOSPES, Otto; MOL, Arthur P.J., **Governing biofuels in Brazil: A comparison of ethanol and biodiesel policies**. Energy Policy, v. 61, p. 22–30, 2013.

STEEN, Bengt; CARLSON, Raul; LÖFGREN, Göran, **L95/196 12/95 SPINE A Relation Database Structure for Life Cycle Assessments SPINE -A Relation Database Structure for Life Cycle Assessments Contents**, [s.l.: s.n.], 1995.

TIAN, Zhuoli *et al.* **Anaerobic digestion for treatment of stillage from cellulosic bioethanol production.** *Bioresource Technology.* v. 144. p. 387–395. 2013.

UBIRAJARA, S. **Etanol carburante no Brasil: evolução, cenários e o seu desempenho sob os critérios da Renovabio.** Ufba.br, 2021.

ZOCHE, L. **Identificação das limitações da ACV sob a ótica de pesquisas acadêmicas.** Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa-PR, 2014.