



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

RAFAELA DE MELO FREIRE

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS A PARTIR DO LICOR DE PENTOSE DA BIOMASSA EM
BIORREFINARIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Recife

2023

RAFAELA DE MELO FREIRE

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS A PARTIR DO LICOR DE PENTOSSES DA BIOMASSA EM
BIORREFINARIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientadores: Prof. Dr. Luiz Stragevitch

Profa. Dra. Jéssica Marcon Bressanin

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Freire, Rafaela de Melo.

Avaliação técnico-econômica e ambiental da produção de biogás a partir do licor de pentoses da biomassa em biorrefinarias de cana-de-açúcar / Rafaela de Melo Freire. - Recife, 2023.

49 p. : il., tab.

Orientador(a): Luiz Stragevitch

Coorientador(a): Jéssica Marcon Bressanin

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2023.

Inclui referências.

1. Biorrefinarias. 2. Biometano. 3. Avaliação econômica. 4. Avaliação do ciclo de vida. 5. Licor c5. I. Stragevitch, Luiz . (Orientação). II. Bressanin, Jéssica Marcon . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAFAELA DE MELO FREIRE

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE
BIOGÁS A PARTIR DO LICOR DE PENTOSE DA BIOMASSA EM
BIORREFINARIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 16/05/2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LUIZ STRAGEVITCH
Data: 22/05/2023 12:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Stragevitch (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 JESSICA MARCON BRESSANIN
Data: 23/05/2023 11:03:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Jéssica Marcon Bressanin (Coorientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 JOSE GERALDO DE ANDRADE PACHECO FILI
Data: 27/05/2023 21:15:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 ALLAN DE ALMEIDA ALBUQUERQUE
Data: 23/05/2023 14:09:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Allan de Almeida Albuquerque (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/FINEP, em particular ao PRH 30.1, do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projeto BioValue, com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (APQ0074-3.06/2019) e das empresas EMBRAER S.A, KLABIN S.A., PETROBRAS S.A. e SUZANO S.A. A esse projeto agradeço os meios colocados à disposição para elaboração do trabalho.

Gostaria de agradecer ao grupo de trabalho do Work Package 4/UFPE do Projeto BioValue. Em especial, ao meu orientador Luiz Stragevitch e à minha coorientadora Jéssica Bressanin. Ao Professor Luiz, por todo o acompanhamento na condução deste trabalho e pelas recomendações concedidas ao longo do trajeto. À Jéssica, pela amizade e por se empenhar intensamente em passar todos os seus conhecimentos para que eu pudesse fazer melhor a cada dia que passasse. Também agradeço imensamente ao Professor Diogo Simões, pela paciência, disponibilidade e por todos os ensinamentos prestados.

Reconheço o papel dos docentes do Departamento de Engenharia Química da UFPE, que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para meu crescimento ao longo do curso, permitindo que eu chegasse até aqui. Sobretudo, agradeço à professora Celmy Barbosa, por todo o carinho e incentivo. Também agradeço a todos os colegas de curso que de alguma forma me apoiaram ao longo desses anos.

O maior agradecimento dirijo à minha mãe, Vilma, meu padrasto, Anderson, meus irmãos, Hugo e Renata, e meu namorado, Ivson. Obrigado pelo acolhimento, amor e motivação incondicionais que me proporcionam todos os dias e que me dão a força necessária para não só concluir este trabalho, mas para querer sempre mais.

RESUMO

No Brasil, a produção de etanol de segunda geração (2G) a partir da biomassa da cana-de-açúcar pode contribuir para a transição energética, assim como para o aumento da competitividade do país no mercado global de biocombustíveis. Durante o pré-tratamento da biomassa lignocelulósica para produção de etanol 2G, é obtida uma fase líquida rica em pentoses, o licor C5, cuja conversão em etanol apresenta diversos desafios, entre os quais a alta demanda energética e o baixo rendimento. Assim, neste trabalho foi realizada a avaliação técnico-econômica e ambiental de um cenário alternativo de biorrefinaria de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração em que o licor C5 é transformado em biometano [cenário 1G2G+B(v+C5)]. O desempenho desse cenário foi comparado com dois outros cenários em que o licor C5 é aplicado na produção de etanol 2G, um em que apenas a vinhaça obtida como resíduo da destilação do etanol é biodigerida [cenário 1G2G+B(v)] e outro em que não há biodigestão (cenário 1G2G). A avaliação foi realizada com o auxílio da plataforma da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC), onde os resultados dos balanços de massa e energia dos cenários, simulados no Aspen Plus®, foram empregados na aplicação de técnicas de engenharia econômica e de avaliação do ciclo de vida (ACV). De acordo com os resultados obtidos, a escolha pela biodigestão do licor C5 no cenário 1G2G+B(v+C5) aumentou a produção de biometano em 98,0% e diminuiu a de etanol em 10,7% em relação ao cenário 1G2G+B(v). Ainda, a adição de uma unidade de biodigestão e *upgrading* elevou o CAPEX em 18,9 e 22,8% nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), respectivamente, quando comparadas ao cenário 1G2G, enquanto que a receita aumentou em 3,2% no primeiro cenário e diminuiu em 3,8% no segundo devido à menor produção de etanol. Consequentemente, o cenário 1G2G+B(v+C5) apresentou a menor viabilidade econômica entre os três casos estudados, com uma razão VPL/CAPEX de 0,16. Os cenários 1G2G+B(v) e 1G2G apresentaram atratividades bastante próximas, com VPL/CAPEX de 0,30 e 0,34, respectivamente. Além disso, a substituição do diesel fóssil pelo biometano nas operações de transporte de cana-de-açúcar e no maquinário agrícola nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5) reduziu as emissões específicas de gases de efeito estufa (GEE) do etanol em 22,2 e 19,9%, respectivamente, em relação ao cenário 1G2G. Portanto, com base nas premissas adotadas neste trabalho, pode-se afirmar que, embora a biodigestão do licor C5 seja uma alternativa viável, ela não é a mais vantajosa entre os três cenários. A produção de biometano exclusivamente a partir da vinhaça mostrou ser a opção mais promissora, reunindo uma substancial redução das emissões de GEE com um atraente resultado econômico.

Palavras-chave: biorrefinarias; biometano; avaliação econômica; avaliação do ciclo de vida; licor C5; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

In Brazil, the production of second-generation ethanol (2G) from sugarcane biomass may contribute to the energy transition process and increase the country's competitiveness in the global biofuels market. During the pre-treatment of lignocellulosic biomass for 2G ethanol production, a liquid phase, rich in pentose sugars, the C5 liquor, is obtained, whose conversion into ethanol presents several challenges, including a high energy demand and a low yield. Therefore, in this study, a technical-economic and environmental assessment of an alternative scenario for first and second generation sugarcane biorefinery that converts C5 liquor into biomethane [scenario 1G2G+B(v+C5)] was carried out. The performance of this scenario was compared with two other scenarios in which the C5 liquor is applied in 2G ethanol production, one that involves the biodigestion of vinasse (obtained from ethanol distillation) only [scenario 1G2G+B(v)] and another that does not include biodigestion (scenario 1G2G). The assessment was carried out with the assistance of the Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) platform, where the energy and mass balances, simulated in Aspen Plus®, were used in the application of economic engineering techniques and life cycle assessment (LCA) methodology. The results showed that the choice for C5 liquor biodigestion in the 1G2G+B(v+C5) scenario increased biomethane production by 98.0% and decreased ethanol production by 10.7% compared to the 1G2G+B(v) scenario. Also, adding a biodigestion and upgrading unit raised CAPEX by 18.9% and 22.8% in 1G2G+B(v) and 1G2G+B(v+C5) scenarios, respectively, when compared to the 1G2G scenario, while revenue increased by 3.2% in the first scenario and decreased in 3.8% in the second due to lower ethanol production. Consequently, the 1G2G+B(v+C5) scenario presented the lowest economic viability among the three cases studied, with a VPL/CAPEX ratio of 0.16. Scenarios 1G2G+B(v) and 1G2G showed very close attractiveness, with VPL/CAPEX ratios of 0.30 and 0.34, respectively. Moreover, the replacement of fossil diesel with biomethane in sugarcane transportation and agricultural machinery operations in scenarios 1G2G+B(v) and 1G2G+B(v+C5) reduced specific greenhouse gas emissions (GHG) from ethanol by 22.2% and 19.9% compared to the 1G2G scenario. Therefore, based on this work's assumptions, it can be stated that, although the C5 liquor biodigestion is a viable alternative, it is not the most advantageous. The production of biomethane exclusively from vinasse has proved to be the most promising option, combining a substantial reduction in GHG emissions with an attractive economic outcome.

Keywords: biorefineries; biomethane; economic evaluation; C5 liquor; life cycle assessment; sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Produtos que podem ser obtidos através dos resíduos do processamento da cana-de-açúcar e do etanol	17
Figura 2 –	Abrangência da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar	18
Figura 3 –	Principais usos do biogás e tecnologias de upgrading necessárias	20
Figura 4 –	Fluxograma do processo de obtenção de biometano	27
Figura 5 –	Esquema do cenário 1G2G	29
Figura 6 –	Esquema do cenário 1G2G+B(v)	30
Figura 7 –	Esquema do cenário 1G2G+B(v+C5)	31
Figura 8 –	CAPEX normalizado dos cenários e contribuição de cada área da biorrefinaria	36
Figura 9 –	Emissões específicas de GEE do etanol normalizadas em relação à gasolina	38
Figura 10 –	Contribuição das etapas do ciclo de vida do etanol para as emissões de GEE	39
Figura 11 –	Contribuição das atividades agrícolas para o impacto de aquecimento global	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais impurezas do biogás e seus efeitos na qualidade do biocombustível	19
Tabela 2 –	Algumas especificações do biometano de produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais	21
Tabela 3 –	Principais premissas adotadas para modelagem e simulação do processo de produção de biometano	27
Tabela 4 –	Visão geral dos cenários estudados	29
Tabela 5 –	Parâmetros adotados na avaliação econômica	32
Tabela 6 –	Fatores de caracterização dos gases causadores do efeito estufa	33
Tabela 7 –	DQO dos substratos	35
Tabela 8 –	Resultados dos indicadores econômicos dos cenários	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira geração
2G	Segunda geração
ACV	Avaliação do ciclo de vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BVC	Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar
C12	Sacarose
C5	Pentoses
C6	Glicose
CAPEX	Custos de capital
CHP	Unidade de cogeração de calor e eletricidade
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
ICV	Inventário do ciclo de vida
IRPJ	Imposto de Renda Pessoa Jurídica
LNBR	Laboratório Nacional de Biorrenováveis
OPEX	Despesas operacionais
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente
VPL	Valor Presente Líquido
TEG	Trietilenoglicol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	BIORREFINARIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	16
2.2	PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO	18
2.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS	21
2.3.1	<i>Payback</i>	22
2.3.2	Valor Presente Líquido	22
2.4	AVALIAÇÃO AMBIENTAL	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS	24
3.1.1	Descrição do sistema de produção da biomassa	25
3.1.2	Descrição do processo industrial	25
3.1.2.1	Produção de Etanol	26
3.1.2.2	Produção de Biometano	26
3.1.3	Descrição dos cenários adotados	28
3.3	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	31
3.4	AVALIAÇÃO AMBIENTAL	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	SIMULAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL	34
4.2	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	36
4.3	AVALIAÇÃO AMBIENTAL	37
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O aumento global no consumo de energia e o crescimento da população mundial, somados à diminuição das reservas de combustíveis fósseis e à demanda urgente de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), provocaram a necessidade de desenvolver sistemas de energia baseados na utilização de recursos renováveis (AGBOR et al., 2011; KAPOOR et al., 2011). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), no ano de 2022, as emissões de CO₂ aumentaram em 0,9% em relação ao ano anterior, alcançando um recorde histórico de 38,8 Gt. Ainda, se não fossem os esforços recentes que levaram ao crescimento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial, esse aumento teria sido quase três vezes maior.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), as emissões líquidas de CO₂ precisam zerar até o ano de 2050, a fim de limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, conforme os objetivos do Acordo de Paris. Dessa forma, pode-se afirmar que os esforços voltados para a transição energética e a mitigação das emissões de GEE devem se intensificar ainda mais nos próximos anos.

O Brasil desempenha papel estratégico na transição energética mundial, devido a, entre outros fatores, sua vasta experiência no setor sucroenergético, podendo produzir cadeias de valor inteiras e complexas baseadas na exploração dos insumos materiais e energéticos derivados do processamento de cana-de-açúcar, tais como a palha e o bagaço, que consistem nos principais resíduos utilizados na produção de etanol de segunda geração (2G) (GRASSI, PEREIRA, 2019; KLEIN et al., 2019; JUNQUEIRA et al., 2017). A exploração do potencial de obtenção de etanol 2G pode aumentar a produção dos biocombustíveis nacionais em até 50%. Entretanto, existem diversos obstáculos relacionados a esse processo, entre eles o alto custo de produção e a demanda energética elevada (GONÇALVES et al., 2021; RABELO et al., 2011).

De maneira geral, a obtenção de etanol 2G envolve as etapas de pré-tratamento para separação da hemicelulose, hidrólise enzimática para obtenção de açúcares fermentáveis de seis carbonos (C6), fermentação e destilação (ADARME et al., 2019). Enquanto a fermentação dos açúcares C6 liberados como resultado da hidrólise enzimática pode ser realizada através da ação da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, normalmente empregada na produção de etanol de primeira geração, os açúcares de cinco carbonos (C5), liberados do pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, só podem ser convertidos em etanol através da ação de microrganismos geneticamente modificados. Existem, ainda, diversas desvantagens no emprego da fermentação

das pentoses, podendo destacar o rendimento significativamente baixo de etanol, maior demanda energética para os processos fermentativos e de purificação e, consequentemente, diminuição da quantidade de material lignocelulósico disponível para uso como matéria-prima, já que uma maior parcela deve ser destinada para a cogeração de vapor e energia a fim de atender às necessidades do processo (MARIANO et al., 2013; RABELO et al., 2011; JUNQUEIRA, CAVALETT, BONOMI, 2017; DIAS et al., 2016).

Dessa maneira, é possível afirmar que alternativas para o processamento dos açúcares C5 devem ser investigadas, com o intuito de aumentar a produtividade do aproveitamento da biomassa lignocelulósica e o rendimento da biorrefinaria, contribuindo para a melhora da competitividade do etanol 2G. Entre elas, pode-se citar a biodigestão anaeróbia para produção de biogás, que possui as vantagens de utilizar um processo já consolidado com outras matérias-primas para obtenção de um combustível com diversas aplicações, tais como a substituição do diesel fóssil, a injeção na rede de gás natural e a queima direta para suplementação do sistema de cogeração da biorrefinaria. Nesse último caso, é possível reduzir a demanda de bagaço na cogeração e aumentar sua disponibilidade para obtenção de etanol 2G, ampliando o volume final de etanol produzido (MARIANO et al., 2013, RIBEIRO et al., 2017; KLEIN et al., 2019; PAULOSE, KAPARAJU, 2021).

Tendo em vista o que foi exposto, este trabalho tem como objetivo analisar, sob o ponto de vista técnico-econômico e ambiental, um cenário de biorrefinaria de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração em que o licor C5 é alternativamente destinado à produção de biometano. Pretende-se avaliar o seu desempenho através da comparação com dois outros cenários de biorrefinaria em que o licor C5 é aplicado na produção de etanol de 2G, um em que a vinhaça proveniente da destilação do etanol é destinada à biodigestão e outro sem biodigestão. Mais especificamente, deseja-se:

- Simular os três cenários de biorrefinaria no Aspen Plus®, a fim de obter os balanços de massa e energia de cada um deles e aplicá-los nas etapas posteriores de avaliação;
- Aplicar técnicas de engenharia econômica para realizar o cálculo do investimento e dos indicadores de viabilidade dos cenários;
- Aplicar a metodologia de avaliação do ciclo de vida, com o intuito de avaliar os diferentes impactos ambientais dos cenários estudados, com foco na redução das emissões de GEE do ciclo de vida do etanol.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo foi elaborado com o intuito de fornecer as principais definições necessárias para a compreensão deste trabalho. Inicialmente, são apontadas algumas noções sobre o conceito de biorrefinaria e sobre a produção de biogás e biometano. Em seguida, discute-se os fundamentos relativos à avaliação econômica de projetos, onde são descritos os indicadores de rentabilidade utilizados neste trabalho. Por último, são apresentados os conceitos básicos da metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV).

2.1 BIORREFINARIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

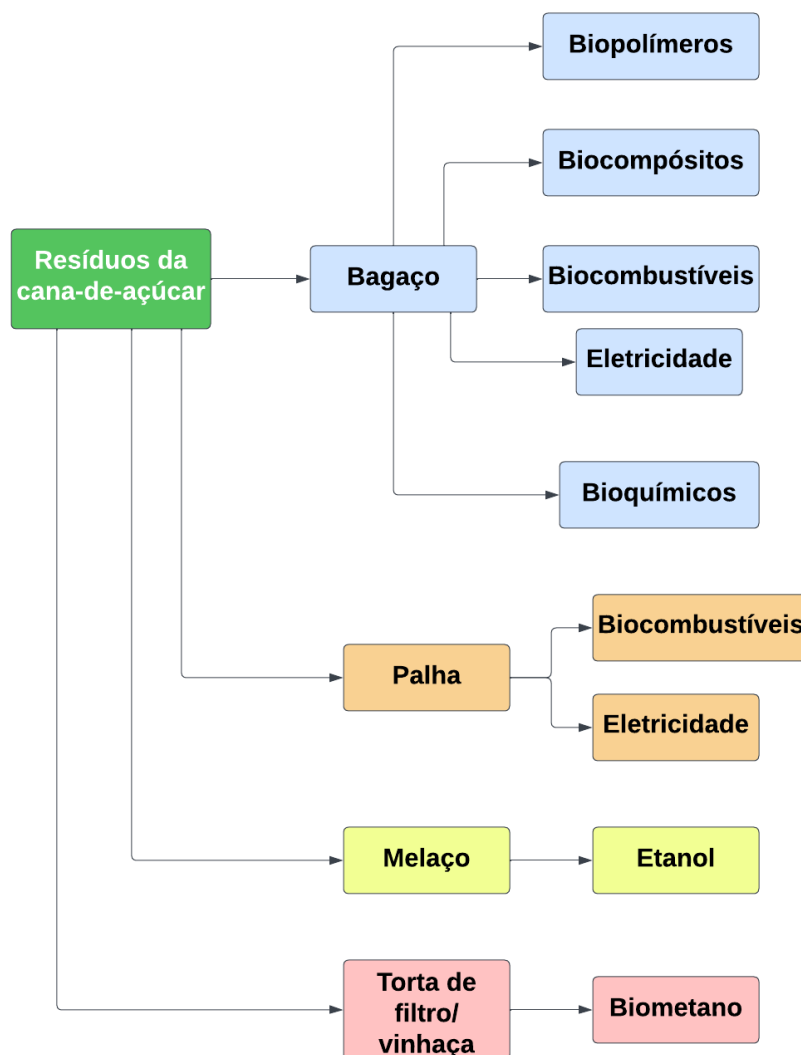
Uma biorrefinaria pode ser definida como uma instalação integrada que combina processos de conversão físicos, termoquímicos e bioquímicos da biomassa para geração de combustíveis, eletricidade, calor e produtos químicos de valor agregado (VELVIZHI et al., 2022).

Atualmente, o principal objetivo no desenvolvimento de biorrefinarias é atingir eficiência máxima de transformação da biomassa em uma variedade de produtos, o que pode melhorar a competitividade em relação aos combustíveis fósseis e, portanto, permitir a expansão desses sistemas. Uma característica importante dessas instalações é o fato de possuírem autonomia e flexibilidade operacional, podendo muitas vezes tolerar variações nas propriedades da matéria-prima e na escolha dos produtos finais (LIEW, HASSIM, NG, 2014).

No Brasil, a cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância econômica, sendo normalmente transformada em açúcar, etanol e eletricidade. A adaptação das destilarias convencionais para biorrefinarias avançadas apresenta-se como um conceito promissor, pois elas podem fornecer eletricidade, vapor e matérias-primas para unidades de conversão industrial da biomassa, permitindo a obtenção de produtos que variam desde o biometano aos biocombustíveis avançados (KLEIN et al., 2018).

Nas biorrefinarias integradas de cana-de-açúcar, os resíduos obtidos durante a produção de açúcar e etanol de primeira geração, tais como o bagaço e a palha (biomassa lignocelulósica), a torta de filtro, a vinhaça e o melaço podem ser, então, convertidos em produtos com valor agregado, como os apresentados na Figura 1 (SINGH et al., 2021).

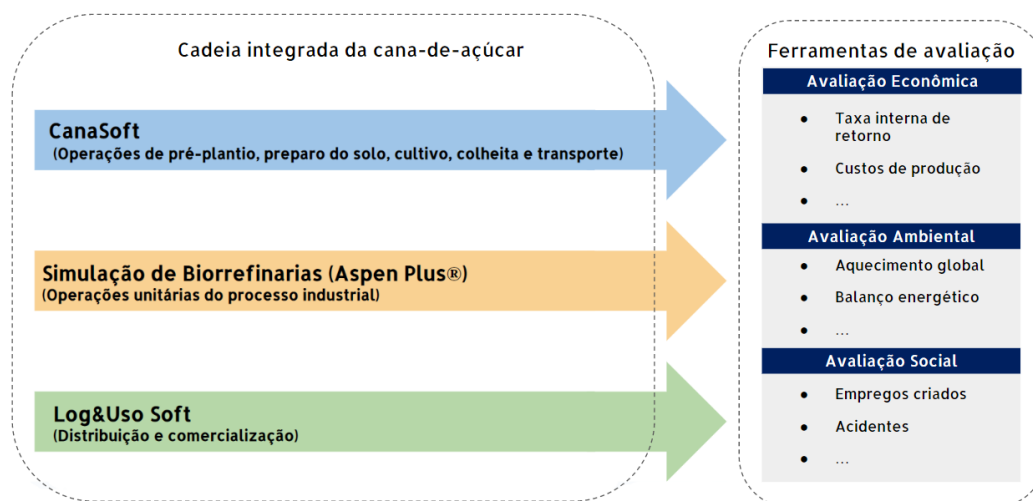
Figura 1 – Produtos que podem ser obtidos através dos resíduos do processamento da cana-de-açúcar e do etanol.



Fonte: Adaptado Singh et al. (2021).

Com o intuito de mensurar o estágio de desenvolvimento de rotas tecnológicas de biorrefinarias de cana-de-açúcar e outras biomassas, o Laboratório Nacional de Biorrenováveis (LNBR) desenvolveu a Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar (BVC), uma ferramenta que integra recursos de modelagem e simulação com ferramentas de avaliação econômica, social e ambiental. Através dessa plataforma, é possível analisar a integração de alternativas para o setor sucroenergético, servindo de guia para apontar a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento de tecnologias existentes, a fim de promover sua competitividade econômica e otimizar os seus benefícios ambientais (JUNQUEIRA et al., 2016; BONOMI et al., 2016; LABORATÓRIO NACIONAL DE BIORRENOVÁVEIS, 2023). A Figura 2 apresenta a abrangência da BVC.

Figura 2 – Abrangência da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar.



Fonte: Adaptado de Junqueira et al. (2016).

Dentro do escopo da BVC, foram desenvolvidos os modelos CanaSoft, que é destinado à simulação e medição dos parâmetros agrícolas mais importantes de diversos sistemas de produção de biomassa, e o Log&UsoSoft, estruturado para calcular os custos operacionais, inventários do ciclo de vida (ICV) e uso de mão de obra para transporte rodoviário do etanol (BONOMI et al., 2016). Por sua vez, os balanços de massa e energia dos processos de conversão da biomassa são realizados no Aspen Plus®, a partir de condições de operação, condições de processo e rendimentos convencionalmente encontrados nas destilarias brasileiras. Por último, os resultados integrados das ferramentas de modelagem são utilizados na aplicação de técnicas tradicionais de engenharia econômica, ACV e para a avaliação de impactos sociais (JUNQUEIRA et al., 2016; CARDOSO et al., 2017).

2.2 PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO

O biogás é um biocombustível produzido pela digestão anaeróbia de matérias-primas orgânicas, provocada por interações sinérgicas entre os membros de uma comunidade microbiana diversificada. Esse processo envolve quatro principais fases, sendo elas a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KAPOOR et al., 2020; FORMANN et al., 2020). O resultado dessa série de etapas consiste em uma mistura composta principalmente por metano e CO₂, contendo também pequenas quantidades de H₂S, umidade e outros contaminantes, a depender do substrato utilizado e das condições físico-químicas nas quais ocorre (MOREIRA

et al., 2022; KAPOOR et al., 2020). A Tabela 1 apresenta os principais contaminantes presentes no biogás e os seus respectivos efeitos na qualidade desse biocombustível.

Tabela 1 – Principais impurezas do biogás e seus efeitos na qualidade do biocombustível.

Componente	Teor	Efeito
CO ₂	25 a 50 % v/v	Reduz o poder calorífico do biogás; provoca corrosão na presença de umidade
H ₂ S	0 a 0,5 % v/v	Efeito corrosivo em equipamentos e tubulações; emissões de SO ₂ ; envenena catalisadores
NH ₃	0 a 0,5 % v/v	Emissões de NO _x após a queima, danificando as células a combustível
Vapor d'água	1 a 5 % v/v	Promove a corrosão de equipamentos e tubulações; a formação de condensado danifica instrumentos e plantas; risco de congelamento de tubulações
Poeira	> 5 µm	Entupimento de bocais e células a combustível
N ₂	0 a 5 % v/v	Reduz o poder calorífico do biogás
Siloxanos*	0 a 50 mg/m ³	Agem como abrasivos, danificando motores

*Componentes típicos de gás de aterro

Fonte: Adaptado Deublein e Steinhauser (2008).

A produção de biogás ocorre em um sistema fechado denominado biodigestor, onde parâmetros tais como temperatura, agitação, tempo de retenção hidráulica e tempo de retenção de sólidos são controlados. Os principais biorreatores utilizados são reatores tubulares, lagoas anaeróbias e reatores UASB (FORMANN et al., 2020; MOREIRA et al., 2022). Em termos de bioenergia, é possível afirmar que a obtenção de biogás por biodigestão anaeróbia é um processo bem conhecido, aplicado em muitas instalações de tratamento de resíduos em larga escala, com baixo custo de operação e baixo consumo de energia (RIBEIRO et al., 2017).

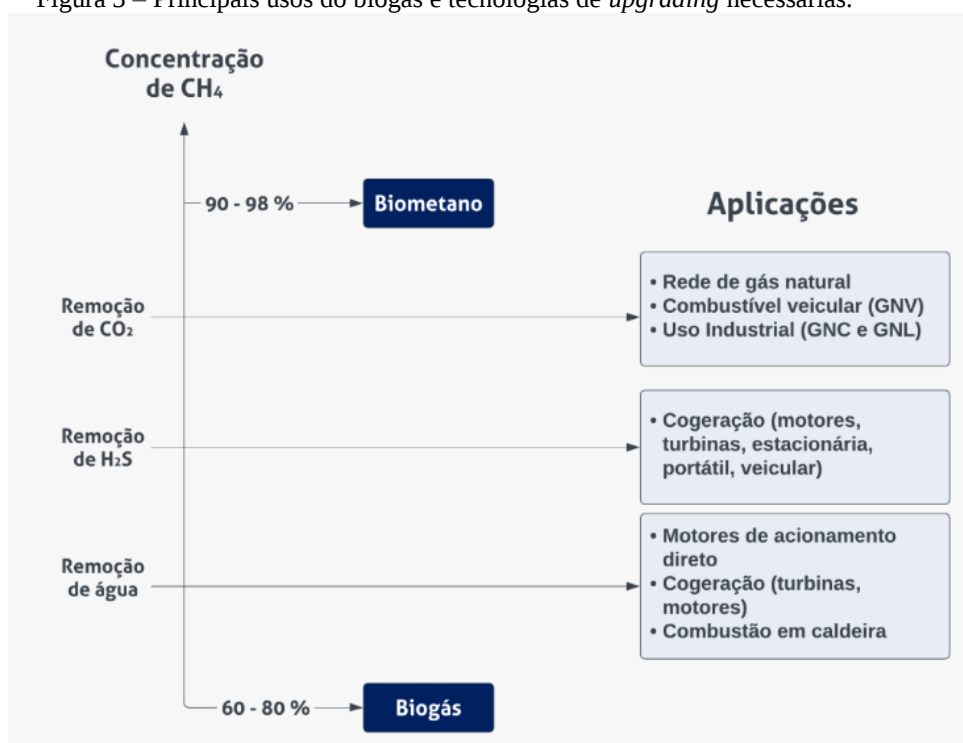
Com o intuito de expandir a utilização da biomassa lignocelulósica, a partir de diversas matérias-primas, para produção de combustíveis, alguns estudos têm explorado a digestão anaeróbia da biomassa após métodos variados de pré-tratamento, tais como pré-tratamento ácido, alcalino, hidrotérmico, cavitação hidrodinâmica, explosão a vapor e ozonização (AGARWAL et al., 2022; LIMA et al., 2022; RIBEIRO et al., 2017; ADARME et al., 2019).

Diversos outros estudos analisam o potencial de utilização da vinhaça, resíduo da destilação do etanol, para produção de biogás, devido ao seu potencial poluente, seu alto conteúdo orgânico e seu grande volume produzido por litro de etanol (SOUZA et al., 1982; ELIHIMAS, 2021; HOARAU et al., 2018; MORAES et al., 2014; MOREIRA et al., 2022).

Segundo Adarme et al. (2019), a codigestão da vinhaça e do licor C5 é uma alternativa que produz impactos positivos no rendimento de metano, tendo em vista que a vinhaça promove a diluição do sistema, diminuindo o efeito inibitório provocado pelo furfural e pelo hidroximetilfurfural presentes no licor C5. Além disso, o alto teor de nitrogênio da vinhaça proporciona o balanceamento da razão C/N do substrato, o que evita a suplementação com nutrientes que seria necessária para a biodigestão direta do licor C5.

O biogás apresenta diversos usos que determinam o nível de pureza que ele deve apresentar, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Principais usos do biogás e tecnologias de *upgrading* necessárias.



Fonte: Adaptado de PROBIOGÁS (2015).

Existem duas principais etapas no tratamento do biogás: a limpeza, que consiste na remoção de substâncias nocivas e tóxicas tais como H₂S, N₂, O₂, CO e NH₃, e o *upgrading*, que consiste no ajuste na proporção de CO₂, aumentando o poder calorífico do biogás. O produto final é o biometano, composto de aproximadamente 95-99% de CH₄, 1-5% de CO₂ e traços

pouco significativos de H_2S (AWE et al., 2017). No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável por determinar as especificações necessárias para caracterizar a qualidade do biometano, apresentadas na Tabela 2, conforme a Resolução nº 906, de 18 de novembro de 2022 (para o biometano oriundo de resíduos agrossilvopastoris e comerciais).

Tabela 2 – Algumas especificações do biometano de produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais.

Característica	Unidade	Limite
Metano, mínimo	% mol	90,0
Oxigênio, máximo	% mol	0,8
CO ₂ , máximo	% mol	3
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máximo	% mol	10
Enxofre total, máximo	mg/m ³	70
H ₂ S, máximo	mg/m ³	10

Fonte: ANP (2022).

As tecnologias atuais de remoção de CO₂ incluem a adsorção por oscilação de pressão (*Pressure Swing Adsorption*, PSA), absorção física e química, criogenia, separação por membranas e enriquecimento biológico de metano. Entre os métodos para remoção de H₂S do biogás, pode-se citar a precipitação química, absorção, adsorção com óxidos de ferro, microaeração, dessulfurização biológica e biofiltração. A água, por sua vez, pode ser removida por condensação da corrente de biogás ou desidratação química (AWE et al., 2017; ELIHIMAS, 2021).

2.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS

A etapa de avaliação econômica de um projeto consiste na análise do seu desempenho e impactos econômicos, a partir da determinação de alguns indicadores normalmente utilizados em engenharia econômica, tais como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), *payback*, custo total de produção e mínimo preço de venda (JUNQUEIRA, CAVALETT, BONOMI, 2016; BRESSANIN et al., 2020; MANDEGARI, GARZAD, GÖRGENS, 2017). A estruturação do fluxo de caixa do projeto, que representa a base para a análise econômica e é essencial para o cálculo dos indicadores, é realizada após a determinação dos valores das

receitas, das despesas operacionais (OPEX) e dos custos de capital (CAPEX) do processo (NEWNAN, ESCHENBACH, LAVELLE, 2004).

A avaliação da rentabilidade do projeto pode ser realizada por meio de técnicas que consideram ou não o valor do dinheiro no tempo, ou seja, não descontadas ou descontadas. Neste trabalho, apenas o segundo tipo foi abordado. Nesse caso, o valor projetado de cada um dos fluxos de caixa é convertido de volta ao tempo zero do projeto por meio da aplicação de uma taxa de desconto e o fluxo de caixa acumulado descontado resultante é utilizado para avaliar a lucratividade (SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014; TURTON et al., 2018).

Os métodos de avaliação se baseiam em três critérios: tempo, dinheiro e taxa de juros, resultando nos indicadores *payback* descontado, VPL e TIR, respectivamente (TURTON et al., 2018).

2.3.1 Payback

O *payback*, ou período de retorno do investimento, de um projeto pode ser definido como o tempo necessário para que o retorno total obtido através da venda de produtos seja igual ao investimento em capital fixo realizado, ou seja, o tempo necessário para atingir o *breakeven point* (TURTON et al., 2018; PETERS, TIMMERHAUS, WEST, 2003; SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014).

A utilização desse indicador parte da suposição de que, quanto mais rápida a recuperação do capital fixo, melhor será o projeto. Entretanto, o uso do *payback* como indicador de rentabilidade apresenta limitações, já que não considera os fluxos de caixa e os lucros obtidos após o ponto de equilíbrio ser alcançado, tornando mais difícil a interpretação dos resultados por essa abordagem (SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014; PERRY, GREEN, MALONEY, 1997). Normalmente, o *payback* atua como um instrumento de decisão entre investimentos empatados, além de fornecer uma estimativa do retorno de um investimento. O cálculo do *payback* descontado, ou seja, do tempo necessário para que o fluxo de caixa descontado seja zerado, serve como uma medida do momento em que o projeto começa a gerar valor para o investidor (GONÇALVES et al., 2009).

2.3.2 Valor Presente Líquido

O VPL é a diferença entre as entradas e saídas do fluxo de caixa descontado de um projeto e pode ser calculado a partir da Equação 1 (SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014):

$$VPL = \sum_{n=0}^{T_{PL}} \frac{C_{f,n}}{(1+r)^n} \quad (1)$$

onde T_{PL} é o tempo total do projeto em anos, r é a taxa de desconto e C_f é o fluxo de caixa no ano n . A taxa de desconto utilizada é a taxa mínima de atratividade (TMA), que representa uma margem mínima aceitável de retorno que torna o projeto atrativo para o investidor. Quando o VPL é positivo, o projeto é capaz de fornecer lucro ao investidor a uma taxa maior que a TMA. Analogamente, o VPL igual a zero indica que o retorno ocorre a uma taxa equivalente à TMA, não havendo perdas nem ganhos, enquanto o VPL negativo indica que o projeto não gera retorno a uma taxa favorável. Logo, um projeto com VPL menor que zero deve ser rejeitado (PETERS, TIMMERHAUS, WEST, 2003; SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014).

2.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A ferramenta mais adequada para a realização de avaliações abrangentes e quantitativas dos impactos ambientais diretos e indiretos associados a um determinado produto ou processo é a metodologia de avaliação do ciclo de vida. Padronizada pelas normas ISO 14040 (THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006a) e 14044 (THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006b), a ACV tem aceitação internacional e é vastamente utilizada na análise da sustentabilidade de cenários de biorrefinaria (SADHUKHAN, NG, HERNANDEZ, 2014).

Por meio da aplicação da ACV, é possível avaliar os aspectos ambientais e potenciais impactos relacionados ao ciclo de vida de um produto, desde a etapa de extração dos recursos naturais utilizados para sua produção até o seu uso e disposição final (COLTRO, 2014). Esse estudo é dividido em quatro etapas: definição de objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, avaliação de impactos e interpretação. Na definição de objetivo e escopo, determina-se o propósito do estudo e as suas fronteiras. A próxima etapa, o ICV, consiste na quantificação de dados de entrada e saída incluídos nas fronteiras do estudo, tais como consumo de recursos naturais e emissões. Posteriormente, esses dados são associados a impactos ambientais específicos e multiplicados por fatores de equivalência relativos à categoria de impacto na etapa de análise de inventário. Por último, esses resultados são interpretados de acordo com os objetivos de cada estudo (CURRAN et al., 1996; COLTRO, 2014).

3 METODOLOGIA

Com o intuito de avaliar o impacto da destinação do licor C5 para a produção de biometano, foram avaliados três cenários de biorrefinaria distintos, cujas conformações estão descritas nas seções a seguir. Os balanços de massa e energia de cada cenário foram obtidos através de suas respectivas simulações e os resultados foram utilizados como dados de entrada para a realização das avaliações econômica e ambiental. Todos esses procedimentos foram executados com base na Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar, acrescentando, quando necessário, novas funcionalidades à plataforma.

3.1 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

A modelagem da fase de produção da biomassa (fase agrícola) foi realizada com base no modelo CanaSoft da BVC, considerando as especificações descritas em Bonomi et al. (2016). Esse modelo suporta a modelagem de cada operação do processo agrícola, considerando fatores como o consumo de infraestrutura, mão de obra e matéria-prima e as suas emissões de GEE (BONOMI et al., 2016). Os resultados foram utilizados para o cálculo dos custos de produção da biomassa, utilizados como dados de entrada na avaliação econômica, e para a construção do ICV.

Por sua vez, a simulação industrial dos cenários de integração foi realizada no *software* Aspen Plus® (v. 10), a partir de um arquivo base 1G2G da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar. Os detalhes relacionados à modelagem e simulação do cenário 1G2G da BVC, tais como a definição das espécies químicas, a composição adotada para a biomassa, a seleção de modelos termodinâmicos e o fluxograma de processo empregado podem ser encontrados em Bonomi et al. (2016). A modelagem do esquema de produção de biometano baseou-se no trabalho de Elihimas et al. (2021), desenvolvido para destilarias de etanol 1G, e foi realizada em conjunto no âmbito do Work Package 4/UFPE do Projeto BioValue. Em todos os cenários, a estimativa da demanda química de oxigênio (DQO) dos substratos utilizados na produção de biometano foi realizada a partir de um bloco *calculator* implementado no simulador.

Para implementação da produção de biometano por meio do licor C5 e da vinhaça de cana-de-açúcar, foram realizadas alterações no arquivo original da BVC. Houve a remoção das unidades de neutralização, diluição e fermentação C5, assim como o encaminhamento da corrente de licor C5 para a nova hierarquia de produção de biometano, onde ela foi misturada à corrente de vinhaça e interligada aos processos que serão descritos posteriormente.

3.1.1 Descrição do sistema de produção da biomassa

O sistema de produção da biomassa inclui todas as etapas relacionadas ao cultivo da cana-de-açúcar e o posterior transporte de biomassa para a biorrefinaria. A descrição detalhada dessas operações pode ser encontrada em Bonomi et al. (2016).

Considera-se que a produção anual de colmos no campo é de 80 toneladas por hectare e que, para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida, obtém-se 140 kg de palha, dos quais 50% são enfardados e enviados para a biorrefinaria (BONOMI et al., 2016). O sistema de produção da biomassa foi dimensionado para suprir uma capacidade anual de processamento de 4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.

Nos cenários em que há produção de biometano, foi considerada a substituição do diesel fóssil no maquinário agrícola e no transporte de cana-de-açúcar durante a safra. A vinhaça produzida na biorrefinaria retorna ao campo em sua forma bruta ou biodigerida, a depender do cenário, para ser aplicada no processo de fertirrigação.

3.1.2 Descrição do processo industrial

As operações que ocorrem nas biorrefinarias estudadas podem ser divididas em dois grupos, as que são voltadas para a produção de etanol e eletricidade e aquelas que são dedicadas à obtenção de biometano. Ainda, existe a unidade de cogeração de calor e eletricidade (CHP), onde ocorre a queima de material lignocelulósico, gerando vapor e eletricidade para atender às demandas do processo.

As biorrefinarias operam 330 dias por ano, nos quais 200 dias correspondem ao período da safra, em que há a produção de etanol a partir do caldo da cana-de-açúcar e da biomassa lignocelulósica, e 130 dias à entressafra, quando apenas a biomassa lignocelulósica é destinada para obtenção de etanol. A capacidade de processamento anual é de 4 milhões de colmos de cana-de-açúcar, e a mesma quantidade de material lignocelulósico está disponível para utilização durante a safra e a entressafra. A proporção de biomassa conduzida para a unidade de etanol 2G varia de acordo com a quantidade de bagaço e palha disponíveis, ou seja, depende da quantidade de material lignocelulósico necessário para alimentar a unidade de CHP (BONOMI et al., 2016).

3.1.2.1 Produção de etanol

A cana-de-açúcar proveniente do campo é recepcionada e passa pelos processos de limpeza e preparo, com o intuito de remover quaisquer impurezas arrastadas durante a colheita e o transporte e de realizar a abertura das células que contém o caldo para facilitar a sua extração, respectivamente. A extração dos açúcares da cana preparada é realizada através de moendas elétricas, onde o caldo é separado do bagaço. O caldo é, então, tratado, concentrado em evaporadores e destinado para a unidade de fermentação C6/C12, onde ocorre a conversão dos açúcares em etanol e CO₂ por meio da atividade metabólica da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. O bagaço, por sua vez, é misturado à palha recolhida do sistema de produção da biomassa e uma parcela desse material é queimada na unidade de CHP (BONOMI et al., 2016).

O restante da biomassa lignocelulósica é destinada à produção de etanol de segunda geração. Para isso, a corrente passa inicialmente pelo processo de pré-tratamento hidrotérmico por explosão a vapor, onde a hemicelulose é solubilizada em açúcares de cinco carbonos. Após o processo de separação líquido-sólido, obtém-se a celulignina e o licor C5. O licor de pentoses pode ter o pH ajustado pela adição de álcali, ser concentrado e fermentado separadamente a etanol por meio da ação de organismos geneticamente modificados, ou sofrer digestão anaeróbia para produção de biogás, a depender do cenário estudado. A fração sólida é, por sua vez, levada para o reator de hidrólise enzimática, onde ocorre a conversão da celulose em glicose, recuperando-se o licor C6 e uma fração sólida rica em lignina, que é queimada na unidade de CHP. O licor C6 é destinado para unidade de fermentação C6/C12, onde é fermentado juntamente com o caldo da cana-de-açúcar no período da safra e isoladamente na entressafra. Todas as correntes de etanol hidratado são separadas do vinho na mesma unidade de destilação e retificação, de onde se obtém a vinhaça como resíduo, e desidratadas a etanol anidro (99,6% m/m) através da tecnologia de adsorção com peneiras moleculares (BONOMI et al., 2016).

3.1.2.2 Produção de biometano

O fluxograma de produção de biometano adotado e simulado no Aspen Plus® tem como base os modelos propostos por Elihimas (2021) e Leme e Seabra (2017). A primeira etapa do processo é a biodigestão anaeróbia dos substratos adotados em cada um dos cenários, ou seja, apenas a vinhaça ou a mistura de licor C5 e vinhaça, em um reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) (SOUZA et al., 1992). Em seguida, o biogás é encaminhado para os

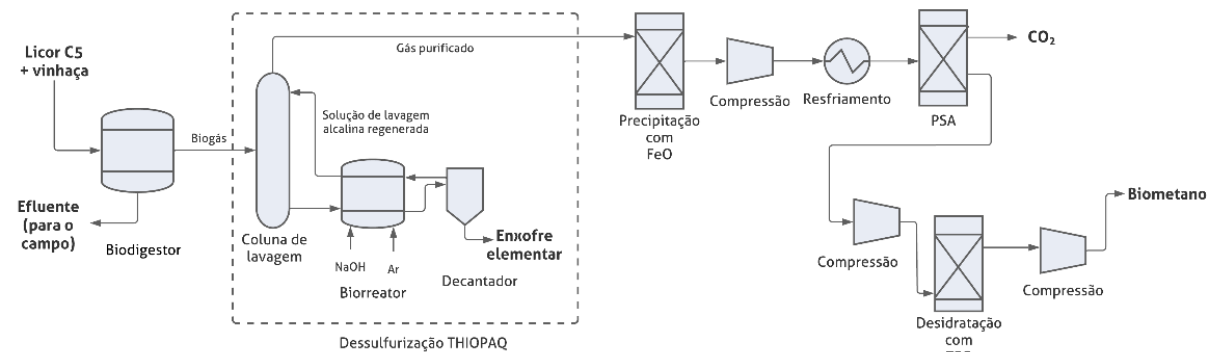
processos de *upgrading*. A Tabela 3 apresenta as principais premissas consideradas na modelagem da produção de biometano e o fluxograma adotado pode ser visto na Figura 4.

Tabela 3 – Principais premissas adotadas para modelagem e simulação do processo de produção de biometano,

Parâmetro	Valor	Referência
Temperatura da biodigestão (°C)	55	Moraes et al. (2014)
Carga orgânica volumétrica (kg DQO _{aplicada} /m ³ reator dia)	15	Ferraz Junior et al. (2016)
Eficiência da remoção de DQO (%)	85	Assumido
Fator de produção de biogás (Nm ³ CH ₄ /kg DQO _{removida})	0,29	Milanez et al. (2015)
Teor máximo de CO ₂ no biometano (%)	3	ANP (2017)
Teor máximo de H ₂ S no biometano (mg/m ³)	10	ANP (2017)

Fonte: A autora (2023).

Figura 4 – Fluxograma do processo de obtenção de biometano.



Fonte: A autora (2023)

A primeira etapa da purificação do biogás a biometano é a remoção de H₂S, através do processo de dessulfurização THIOPAQ® (PAQUES, 2023). Nesse processo, a corrente de biogás escoar através de uma coluna de lavagem alcalina, onde o gás sulfídrico é absorvido de forma contínua através de uma solução de NaOH pulverizada em contracorrente. Na base da coluna é obtida uma solução rica em NaHS que é encaminhada para um biorreator, onde o substrato é digerido pela ação de bactérias anaeróbias, obtendo-se enxofre elementar. A solução alcalina é regenerada e o enxofre é recuperado em um decantador (LEME, SEABRA, 2017; PAQUES, 2023). O biogás com baixo teor de enxofre é, por sua vez, recuperado no topo da coluna e passa por um processo de remoção dos resquícios de H₂S por meio da precipitação com óxido de ferro (ALLEGUE, HINGE, 2014).

Em seguida, o gás é comprimido e resfriado, a fim de alcançar as condições adequadas de temperatura e umidade para o processo de *Pressure Swing Adsorption* (PSA). O PSA tem como intuito remover o CO₂ presente no biogás, a fim de atingir as especificações determinadas pela ANP. O sistema é formado por um conjunto de colunas de adsorção constituídas por peneiras moleculares que funcionam em paralelo, alternando entre os modos de serviço, despressurização, regeneração e repressurização (CARBOTECH, 2023; URBAN, GIROD, LOHMANN, 2008). A corrente de biogás passa através das colunas, retendo o CO₂ enquanto o CH₄ escoar livremente. Quando uma coluna está próxima do ponto de saturação, o gás é direcionado para uma coluna recém-regenerada e o adsorvedor saturado é expandido em uma pressão intermediária, liberando uma corrente de gás que é levada para uma coluna recém-expandida. Posteriormente, o adsorvedor é expandido à pressão atmosférica, obtendo-se o CO₂ que estava retido (URBAN, GIROD, LOHMANN, 2008; GREENE, 2018).

O biometano obtido na saída do PSA é, então, comprimido e levado a uma coluna de absorção, onde é desidratado através do contato com uma solução de trietilenoglicol (TEG) circulando em contracorrente. O TEG é recuperado num sistema de regeneração e recirculado para a coluna de adsorção (CHEBBI, 2019).

A corrente de biometano que sai da desidratação com TEG é condicionada através de uma série de estágios de compressão até alcançar 250 bar. Essa é a pressão máxima do gás natural veicular (GNV) utilizada para abastecer veículos até 220 bar. Considera-se que o biometano comprimido é transportado até o ponto de entrega a 20 km da biorrefinaria.

3.1.3 Descrição dos cenários adotados

O modelo de biorrefinaria de primeira e segunda geração da BVC, descrita por Bonomi et al. (2016), serviu como cenário-base de referência para o estudo. A esse modelo foi integrado o processo de obtenção de biometano em duas configurações ligeiramente distintas, totalizando os três cenários estudados, cujas principais características estão descritas na Tabela 4.

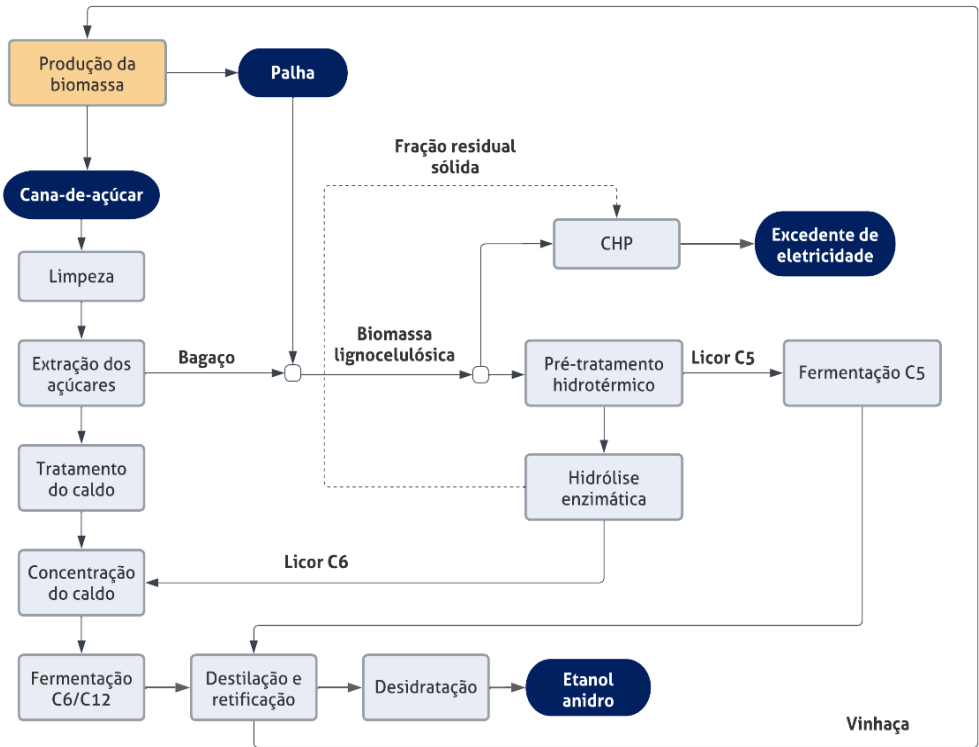
Tabela 4 – Visão geral dos cenários estudados.

Cenário	1G2G (base)	1G2G+B(v)	1G2G+B(v+C5)
Destino da vinhaça	Aplicação direta no campo	Biodigestão (aplicação do efluente no campo)	Biodigestão (aplicação do efluente no campo)
Destino do Licor C5	Produção de etanol 2G	Produção de etanol 2G	Produção de biometano
Produtos	Etanol anidro e eletricidade ^a	Etanol anidro, eletricidade, biometano e enxofre	Etanol anidro, eletricidade, biometano e enxofre

^a Eletricidade produzida na unidade de cogeração
Fonte: A autora (2023).

No cenário base 1G2G (Figura 5), o caldo da cana-de-açúcar é aplicado na produção de etanol 1G e o material lignocelulósico é dividido em duas correntes. A primeira delas sofre a queima direta para suprimento da demanda de vapor da biorrefinaria, gerando excedente de eletricidade, destinada à venda como co-produto. O restante do material lignocelulósico é tratado e os licores C5 e C6 são destinados para a produção de etanol 2G, conforme os procedimentos descritos na seção 3.1.2. A vinhaça obtida como resíduo da destilação é utilizada para fertirrigação no sistema de produção da biomassa.

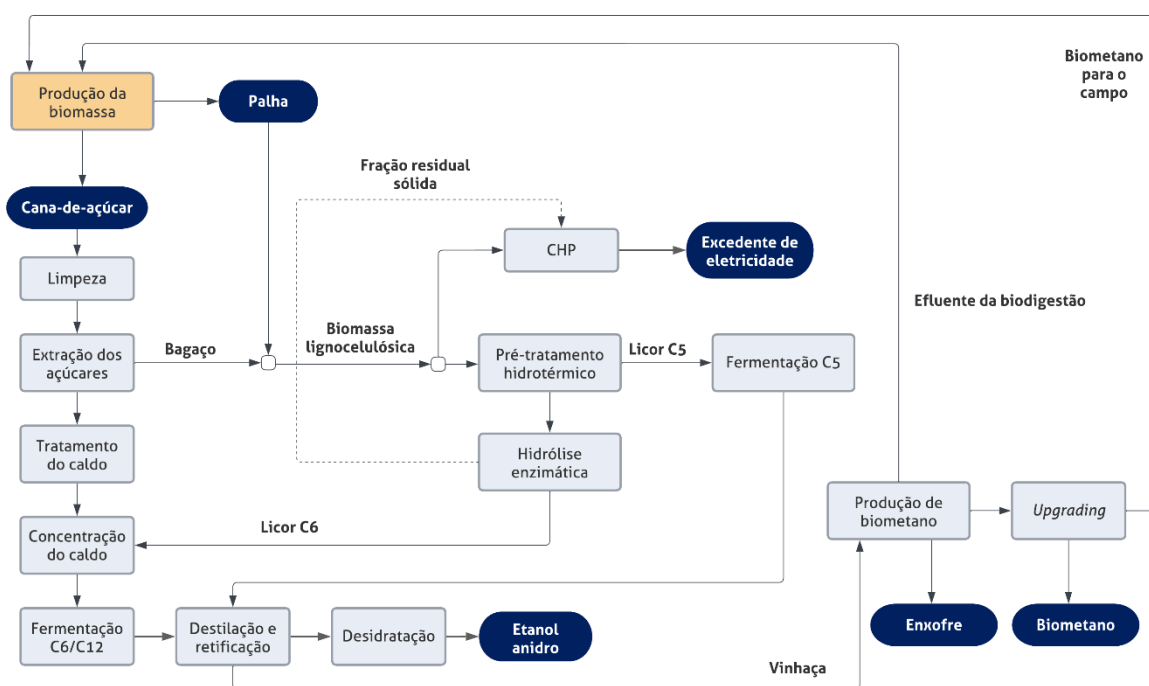
Figura 5 – Esquema do cenário 1G2G.



Fonte: A autora (2023)

No cenário 1G2G+B(v) (Figura 6), a produção de etanol de primeira e segunda geração ocorre tal qual descrito no caso anterior, exceto que a vinhaça é, nesse contexto, empregada na produção de biometano. O resíduo da produção de biometano, a vinhaça biodigerida, contém todos os nutrientes necessários para o processo de fertirrigação e, por isso, é levada de volta para o sistema de produção da biomassa.

Figura 6 – Esquema do cenário 1G2G+B(v).

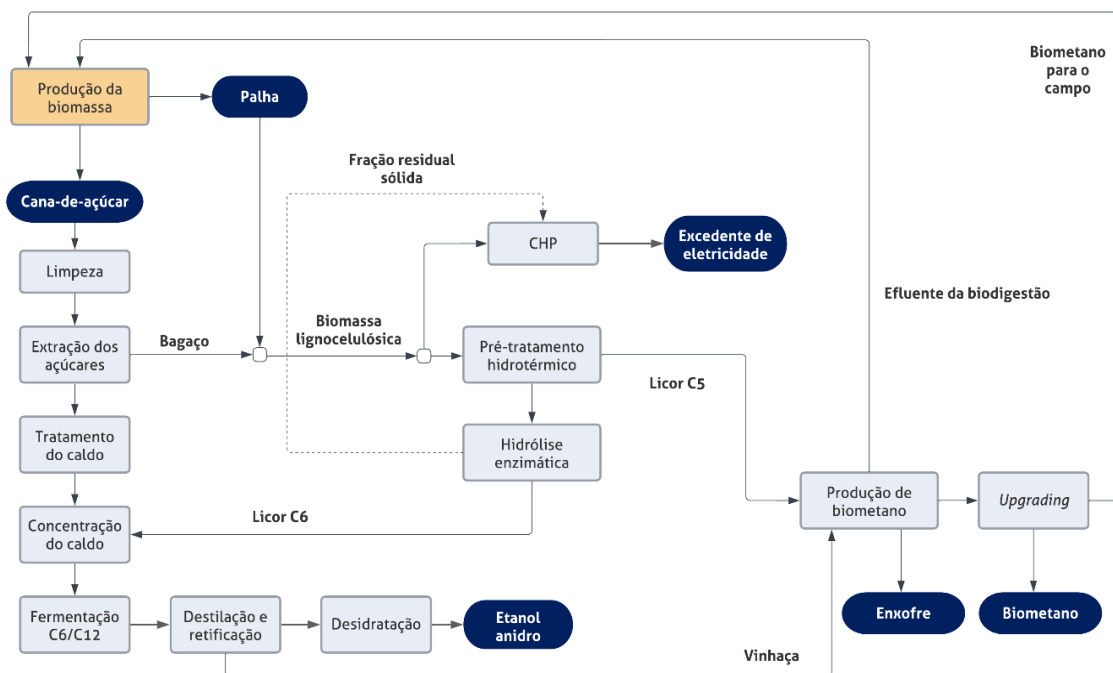


Fonte: A autora (2023)

Por último, no cenário 1G2G+B(v+C5) (Figura 7), o licor C5 obtido após o pré-tratamento do material lignocelulósico é misturado à vinhaça e aplicado na produção de biometano. A produção de etanol de primeira geração permanece a mesma, enquanto obtém-se etanol 2G apenas a partir do licor C6.

Em ambos os cenários em que há obtenção de biometano, uma parcela da produção é aplicada para substituição do diesel fóssil nas operações agrícolas e de transporte de cana-de-açúcar, enquanto o restante é comercializado. O enxofre elementar resultante do processo de dessulfurização THIOPAQ® é considerado como um subproduto e destinado à venda.

Figura 7– Esquema do cenário 1G2G+B(v+C5).



Fonte: A autora (2023)

3.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

O investimento e os indicadores econômicos foram calculados de maneira automatizada através das planilhas de avaliação econômica da BVC, tendo como dados de entrada os resultados dos balanços de massa e energia obtidos pela simulação dos processos de cada cenário. As planilhas foram atualizadas para incluírem custos de equipamentos, processos, insumos e mão de obra, assim como os preços dos produtos, relativos ao modelo de produção de biometano, em conjunto no contexto Work Package 4/UFPE do Projeto BioValue.

Em todos os cenários, foram considerados projetos do tipo *greenfield* e a data de referência adotada foi dezembro de 2019, assim como nos demais projetos realizados atualmente no âmbito da BVC. A definição dessa data deve-se à carência na publicação de índices atualizados, assim como objetiva desconsiderar efeitos peculiares de mercado. Todas as estimativas de preço utilizadas neste trabalho e provenientes das planilhas de avaliação condizem com a data de referência.

As fontes de receita consideradas nos cenários foram o etanol, o biometano, o enxofre elementar e o excedente de eletricidade obtido do sistema de cogeração. Os principais parâmetros adotados na avaliação econômica estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros adotados na avaliação econômica.

Parâmetro	Valor	Referência
Data de referência	Dezembro de 2019	-
Horizonte de tempo dos projetos (ano)	25	Bonomi et al. (2016)
Taxa mínima de atratividade (TMA)	12 %	Bonomi et al. (2016)
Taxa de depreciação linear (a.a.)	10 %, durante 10 anos	Bonomi et al. (2016)
Impostos sobre a renda (IRPJ + CSLL) ^a	34 %	Milanez et al. (2015)
Preço do etanol anidro (R\$/L)	1,94	CEPEA (2023)
Preço da eletricidade (R\$/MW h)	211,12	CCEE (2023)
Preço do biometano (R\$/Nm ³)	1,37	ANP (2021)
Preço do enxofre (R\$/kg)	0,56	Comex Stat (2023)
Valor do CBIO (R\$/ton)	34	MME (2018)

^a IRPJ: Imposto de Renda Pessoa Jurídica; CSLL: Contribuição Social sobre o Lucro Líquido.

Fonte: A autora (2023).

Os indicadores de rentabilidade adotados para analisar e comparar a viabilidade econômica dos cenários estudados foram o VPL e o período de retorno de investimento.

3.4 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A avaliação dos impactos ambientais dos cenários propostos foi realizada através da aplicação da metodologia de avaliação do ciclo de vida, adotando-se a fronteira do berço ao túmulo. Foram consideradas as etapas de produção e conversão da biomassa, bem como a distribuição e uso dos produtos.

O ICV foi construído com base nos resultados de balanço de massa e energia obtidos das simulações realizadas no Aspen Plus® para a fase industrial e através do modelo CanaSoft para a etapa de produção da biomassa, e posteriormente implementado nas planilhas de avaliação da BVC. O *software* SimaPro e o banco de dados *ecoinvent* 3.4 (WERNET et al., 2016) foram utilizados para o cálculo do impacto associado aos itens do inventário das etapas de produção e conversão da biomassa. Os fatores de emissão para o uso e distribuição do etanol foram baseados na ferramenta RenovaCalc/RenovaBio (ANP, 2020).

A categoria de impacto selecionada para a avaliação foi a de aquecimento global, tendo em vista, principalmente, o objetivo de analisar os efeitos da substituição do diesel fóssil no campo para as emissões de GEE do etanol, que constitui o principal produto de interesse da biorrefinaria. As emissões totais de GEE foram calculadas a partir dos fatores de caracterização do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) para um horizonte de tempo de 100 anos, apresentados na Tabela 5.

Como o sistema tem mais de um produto, a atribuição dos impactos das etapas de produção e conversão da biomassa para cada um deles considerou a alocação energética através do poder calorífico inferior. Dessa forma, foram obtidas as emissões específicas de GEE do etanol em g CO₂eq/MJ.

Tabela 6 – Fatores de caracterização dos gases causadores do efeito estufa

Gás de efeito estufa (GEE)	Potencial de aquecimento global para um horizonte de tempo de 100 anos (g CO₂eq/g GEE)
CO ₂	1,0
CH ₄	28,0
N ₂ O	265,0

Fonte: IPCC (2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho foi desenvolvido dentro do escopo do Work Package 4/UFPE do Projeto BioValue, visando contribuir para a avaliação de novas cadeias produtivas integradas de cana-de-açúcar, e faz parte de um conjunto de cenários onde a produção de biometano foi estudada. Dessa maneira, os resultados obtidos foram apresentados de forma percentual (em comparação com o cenário base), omitindo-se os valores absolutos devido aos termos de confidencialidade do projeto.

4.1 SIMULAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL

Em todos os cenários estudados, o etanol configura-se como o principal produto da biorrefinaria, tendo em vista o modelo industrial 1G2G adotado. Durante a safra, ocorre a produção de grandes quantidades de etanol anidro devido à utilização conjunta do caldo da cana-de-açúcar e da biomassa lignocelulósica. O aproveitamento do bagaço e da palha também na entressafra permite que o volume anual produzido de etanol seja ainda maior, reduzindo o impacto da sazonalidade da cana-de-açúcar, o que representa uma vantagem competitiva em relação a uma destilaria 1G tradicional.

Os resultados das simulações mostram que o tratamento do licor C5 para produção de etanol 2G eleva consideravelmente a demanda de vapor da biorrefinaria e, conseqüentemente, afeta a quantidade final de etanol produzida devido à necessidade de queimar maiores quantidades de biomassa lignocelulósica na unidade de CHP. Esse impacto é especialmente significativo na entressafra: no cenário 1G2G+B(v+C5), a remoção da unidade de concentração do licor C5 reduz substancialmente a demanda por vapor e eletricidade, de tal forma que a fração residual sólida da hidrólise enzimática é capaz de suprir integralmente a demanda da biorrefinaria. Com isso, toda a biomassa lignocelulósica pode ser enviada diretamente para o pré-tratamento hidrotérmico, a fim de aumentar a quantidade de açúcares disponíveis para produção de etanol e biometano. Em contrapartida, a escolha pela biodigestão do licor C5 reduz a proporção de substrato disponível para produção de etanol, de tal forma que há uma queda de 7,8% na vazão produzida deste biocombustível na safra e de 36,6% na entressafra, representando anualmente uma redução de 10,7% no cenário 1G2G+B(v+C5) em relação aos cenários 1G2G e 1G2G+B(v), onde a produção de etanol é equivalente. Além disso, como menos material lignocelulósico é queimado no CHP, a disponibilidade de excedente de

eletricidade é 17,2% menor no cenário 1G2G+B(v+C5) quando comparado com o cenário 1G2G.

No cenário 1G2G, conforme explicitado anteriormente, toda a vinhaça proveniente da purificação do etanol é aplicada diretamente no campo no processo de fertirrigação. Esse tipo de procedimento é normalmente executado nas destilarias atuais, porém esse sistema de gestão da vinhaça contribui para o aumento das emissões de metano durante as etapas de armazenamento e transporte, devido à decomposição da matéria-orgânica (HOARAU et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2017). Nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), é possível agregar valor a esse resíduo, utilizando-o para produzir biometano e, ao mesmo tempo, devolver nutrientes para o campo com menores emissões associadas ao armazenamento e transporte do efluente.

A Tabela 7 apresenta a DQO calculada para as correntes utilizadas como substrato na biodigestão anaeróbia. É possível observar que o licor C5 puro apresenta uma elevada DQO, devido ao alto teor de açúcares liberados após o processo de pré-tratamento, principalmente a xilose. A vinhaça, por sua vez, é constituída majoritariamente por água, apresentando uma DQO menor. A mistura dessas correntes gera um substrato diluído, principalmente na safra, quando o volume de vinhaça produzida é elevado.

Tabela 7 – DQO dos substratos.

Corrente	DQO calculada (kg/m³)
Licor C5	199,5
Vinhaça 1G2G (Safra)	31,8
Vinhaça 1G2G (Entressafra)	81,6
Licor C5 + Vinhaça 1G2G (Safra)	45,9
Licor C5 + Vinhaça 1G2G (Entressafra)	134,7

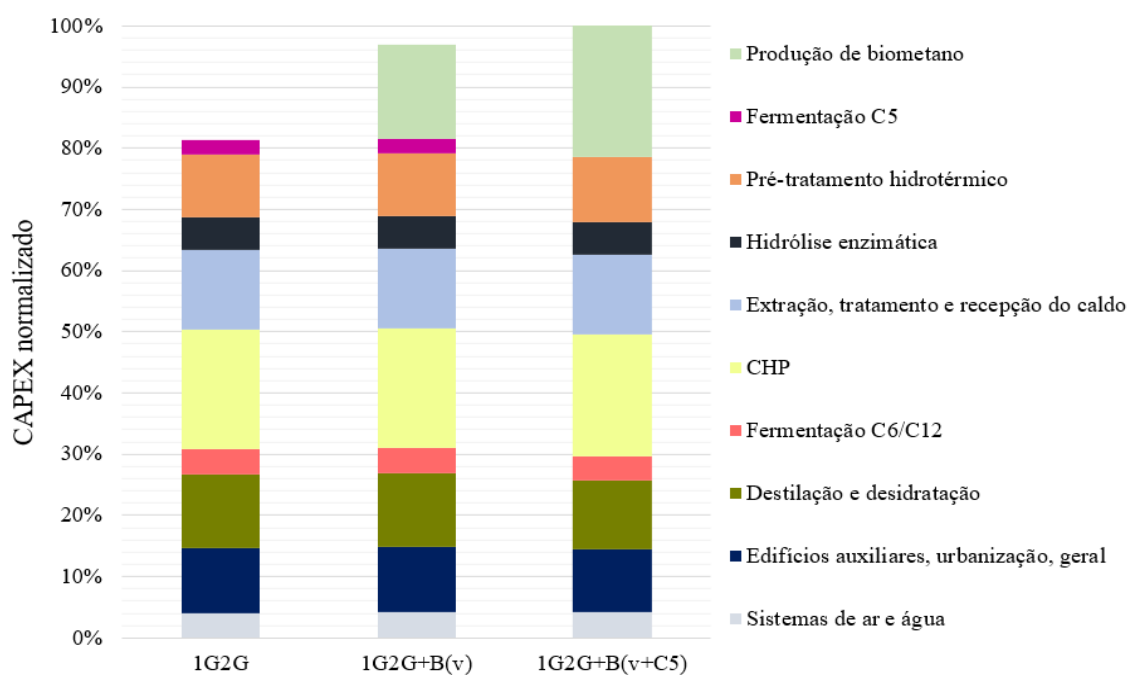
Fonte: A autora (2023).

Em relação ao cenário 1G2G+B(v), verifica-se um aumento de 61,9% na produção de biogás bruto na safra e de 113,5% na entressafra a partir da codigestão da vinhaça e do licor C5 no cenário 1G2G+B(v+C5). Em ambos os cenários, é possível produzir o volume de biometano necessário para a substituição do diesel fóssil usado na etapa de produção da biomassa, gerando também um excedente destinado para a venda. No cenário 1G2G+B(v+C5) houve um aumento de 98,0% na produção anual total de biometano.

4.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A Figura 8 mostra o *breakdown* do CAPEX calculado para cada um dos cenários estudados, normalizado pelo maior valor entre eles.

Figura 8 – CAPEX normalizado dos cenários e contribuição de cada área da biorrefinaria.



Fonte: A autora (2023).

Em relação ao cenário 1G2G, há um aumento de 18,9% nos custos de investimento da biorrefinaria no cenário 1G2G+B(v) com a inclusão de uma unidade de produção de biometano. No cenário 1G2G+B(v+C5), esse aumento é de 22,8%, devido ao acréscimo da capacidade de processo das unidades de biodigestão e *upgrading*, mesmo com a eliminação dos custos da unidade de fermentação C5.

Nos cenários em que há biodigestão, duas novas fontes de receita são adicionadas ao fluxo de caixa da biorrefinaria, o biometano e o enxofre. A diversificação do portfólio de produtos da biorrefinaria e o aproveitamento da vinhaça, que era outrora um resíduo, promoveram um aumento de 3,2% na receita anual no cenário 1G2G+B(v) em relação ao cenário-base. No cenário 1G2G+B(v+C5), por outro lado, há uma queda de 3,8%, mesmo que a produção de biometano seja aproximadamente duas vezes maior que para o cenário 1G2G+B(v). Nesse caso, a redução na produção de etanol promove um maior impacto negativo na receita, devido ao seu valor de mercado superior em relação ao biometano. Ainda, nesses

cenários, pode-se citar a redução nos custos de operação no sistema de produção da biomassa, devido à substituição do diesel fóssil pelo biometano.

A Tabela 8 apresenta o resultado dos indicadores econômicos calculados nos cenários estudados. Todas as configurações propostas podem ser consideradas viáveis, tendo em vista o VPL positivo. O VPL absoluto de cada um dos cenários foi dividido pelos respectivos custos de investimento necessários para sua implementação, com o intuito de permitir a comparação da viabilidade entre eles.

Tabela 8 – Resultados dos indicadores econômicos dos cenários.

Cenário	VPL (mi R\$)	VPL/investimento	Payback descontado (anos)
1G2G	522,9	0,34	10
1G2G+B(v)	541,2	0,30	11
1G2G + B(v+C5)	297,7	0,16	14

Fonte: A autora (2023).

O aumento expressivo no CAPEX devido à inclusão do processo de biodigestão da vinhaça, que não foi acompanhado por um incremento significativo na receita, faz com que o cenário 1G2G+B(v) seja menos viável que o cenário 1G2G, levando em conta a diminuição do VPL/investimento e o aumento do período de retorno do investimento. Essa redução na rentabilidade do projeto ocorre conforme o esperado, levando em conta a necessidade de processos sofisticados para a obtenção de um produto com baixo valor de mercado, tal como o biometano. Porém, este impacto foi pouco expressivo. Assim, outros fatores, tais como os resultados da avaliação ambiental, podem ser decisivos na escolha entre o uso direto da vinhaça e a sua biodigestão.

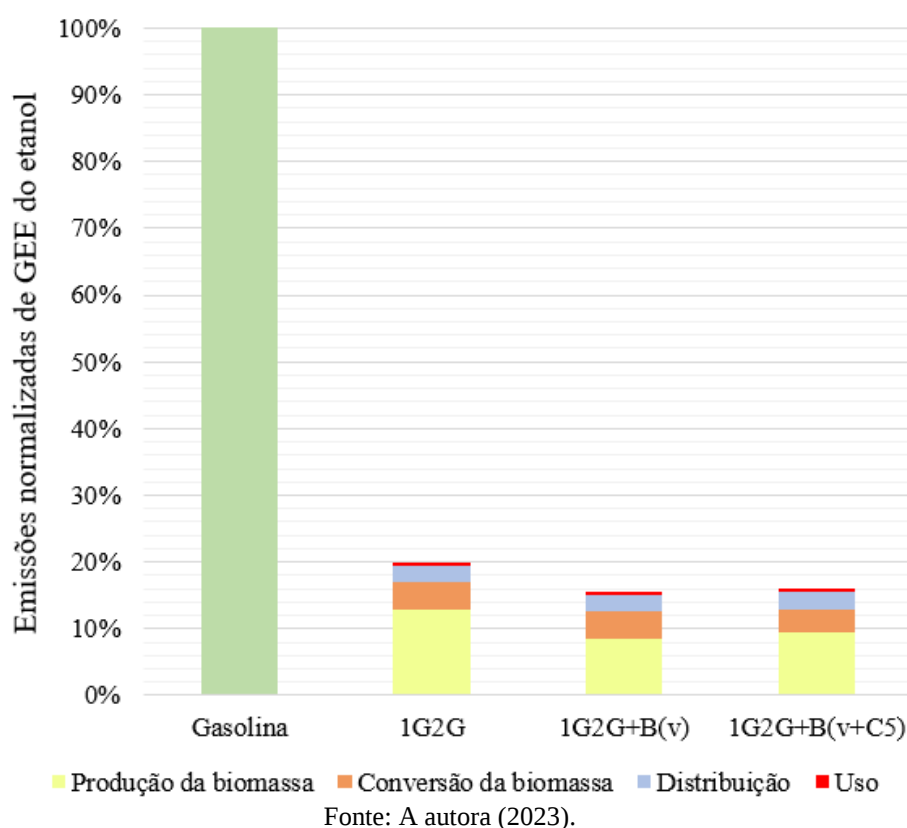
Em contrapartida, o cenário 1G2G+B(v+C5) apresenta, devido ao relevante aumento do CAPEX e simultânea diminuição da receita, um comprometimento significativo na viabilidade econômica quando comparado aos demais cenários. Assim, mesmo que a produção de etanol a partir do licor C5 seja desafiadora e que a conversão da mistura de vinhaça e licor C5 em biogás seja considerável, diminuir a produção de etanol para se obter biometano não se mostrou uma alternativa economicamente vantajosa, levando em conta as condições adotadas neste trabalho.

4.3 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A Figura 9 apresenta o resultado da aplicação da metodologia de ACV para a avaliação do impacto de aquecimento global nas configurações estudadas, representado através das

emissões específicas de gases de efeito estufa do etanol. As emissões, originalmente calculadas em g CO₂eq/MJ etanol, foram normalizadas pelas emissões específicas relativas à gasolina, o combustível fóssil que o etanol pode substituir.

Figura 9 – Emissões específicas de GEE do etanol normalizadas em relação à gasolina.

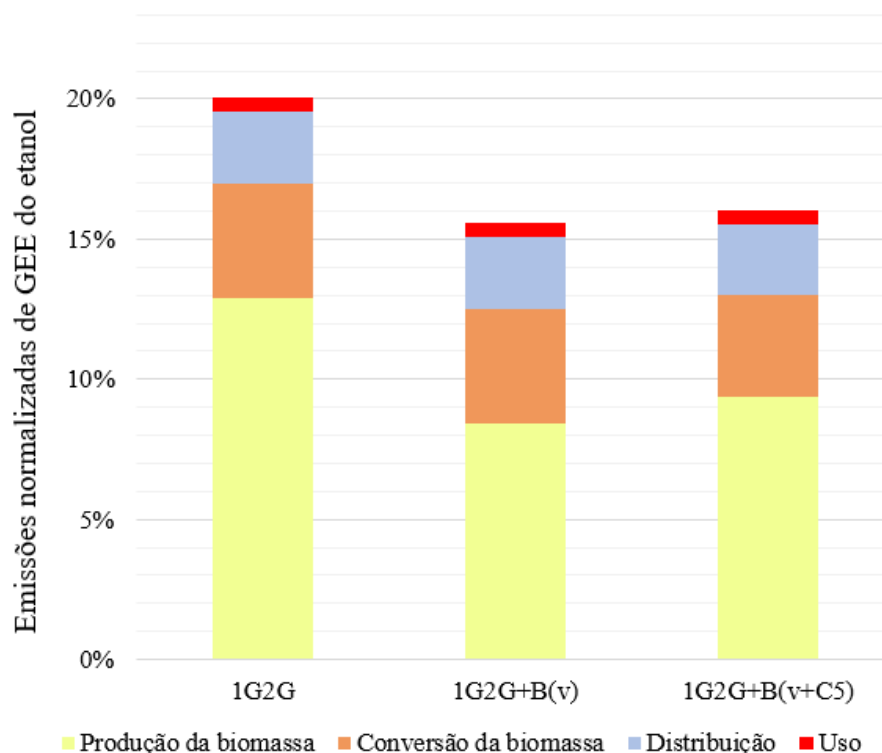


As emissões do etanol são significativamente menores quando comparadas com a gasolina, por se tratar de um combustível derivado da biomassa, inclusive na configuração 1G2G convencional, onde a intensidade de carbono do etanol é 80,0% menor que para seu fóssil equivalente. Ainda assim, existem diversas fontes de emissão presentes no ciclo de vida do etanol, derivados, por exemplo, do uso de fertilizantes e da utilização de combustíveis fósseis no maquinário agrícola, no transporte da cana-de-açúcar e nos veículos utilizados para distribuição do etanol, do transporte e da utilização da vinhaça e do ciclo de vida dos insumos industriais e agrícolas.

Neste trabalho, foi investigado quantitativamente o impacto da destinação de parte do biometano produzido como substituto do diesel fóssil utilizado nas operações de produção da biomassa para as emissões específicas do etanol. Os resultados podem ser vistos na Figura 10,

uma ampliação da Figura 9 que apresenta detalhadamente a contribuição de cada etapa do ciclo de vida do etanol para as emissões específicas totais de GEE.

Figura 10 – Contribuição das etapas do ciclo de vida do etanol para as emissões de GEE.

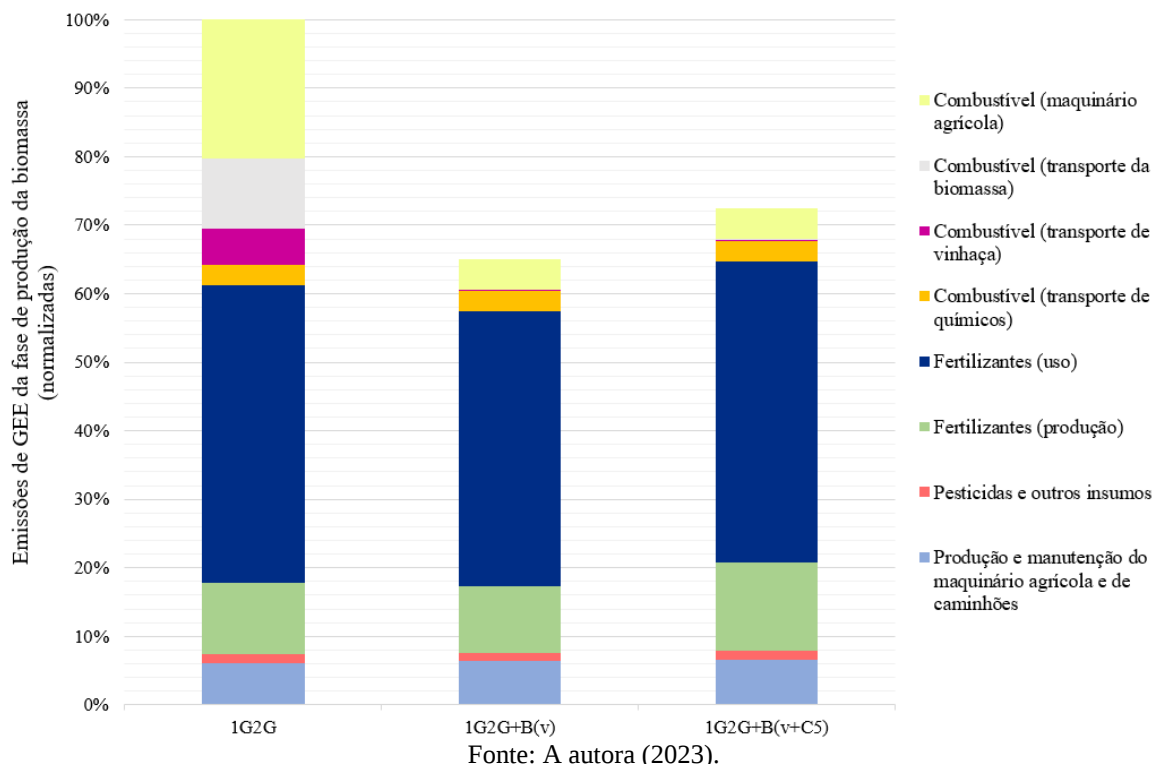


Fonte: A autora (2023).

A redução das emissões associadas ao etanol em relação ao cenário 1G2G é de 22,2% e 19,9% nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), respectivamente. Como pode ser verificado na Figura 10, essa diminuição foi observada principalmente na fase de produção da biomassa e é uma consequência direta da substituição do diesel fóssil pelo biometano. As reduções nas emissões da fase agrícola são de 34,9% e 27,5% nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), respectivamente. No cenário 1G2G+B(v+C5), as emissões são ligeiramente maiores, assim como o impacto da fase de produção da biomassa, devido à menor quantidade de etanol produzido para uma mesma vazão de biomassa produzida no campo.

Apesar da importante queda nas emissões do etanol nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), a fase de produção da biomassa segue como a de maior impacto para as emissões do ciclo de vida do etanol, se destacando em relação às etapas de conversão, distribuição e uso. A Figura 11 apresenta a contribuição de algumas atividades e práticas aplicadas no sistema de produção da biomassa para as suas emissões relativas, normalizadas pelo valor das emissões dessa etapa no cenário 1G2G.

Figura 11 – Contribuição das atividades agrícolas para o impacto de aquecimento global.



A substituição do diesel fóssil pelo biometano nas operações agrícolas e no transporte de cana e vinhaça leva a uma redução de 25% nas emissões da fase de produção da biomassa nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5). Tendo em vista que, no cenário 1G2G, essas emissões representam mais de 30% do total, pode-se afirmar que a produção de biometano na biorrefinaria e a sua subsequente aplicação no campo é um caminho potencialmente vantajoso para reduzir o potencial de aquecimento global associado ao etanol e, consequentemente, aumentar sua nota de eficiência energético-ambiental.

Apesar disso, verifica-se que a maior contribuição para as emissões da fase de produção da biomassa são os fertilizantes, que representam mais da metade do total. Os impactos da etapa de produção industrial desses insumos podem ser reduzidos através de práticas como melhora na eficiência dos processos e substituição dos combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia. Entretanto, essa redução representaria um pequeno ganho, levando em conta que o maior impacto está relacionado às emissões que ocorrem como consequência da aplicação dos fertilizantes no campo e cuja possibilidade de mitigação é muito pequena.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou os impactos econômicos e ambientais da exploração de uma rota alternativa de aproveitamento do licor C5, focada na produção de biometano. Para isso, foi realizada a simulação de três cenários de biorrefinarias no simulador comercial de processos Aspen Plus® e, em seguida, foram aplicadas técnicas de avaliação econômica e ambiental com o auxílio da plataforma BVC.

O primeiro efeito observado na mudança do destino do licor C5 [cenário 1G2G+B(v+C5)] foi a queda na demanda energética na entressafra devido à remoção da etapa de concentração dessa corrente, de tal forma que no cenário 1G2G+B(v) apenas a queima da fração residual sólida da hidrólise enzimática foi suficiente para suprir a demanda de vapor da biorrefinaria, permitindo a destinação de toda a biomassa lignocelulósica disponível para produção de etanol 2G. Apesar disso, houve uma diminuição de 11% na produção total de etanol em relação aos cenários 1G2G e 1G2G+B(v) devido à utilização do licor C5 para produção de biometano e não de etanol. Em relação ao cenário 1G2G+B(v), a quantidade de biometano produzido aumentou em 98%.

Os efeitos da queda na produção de etanol refletiram na diminuição da receita do cenário 1G2G+B(v+C5) em 3,8% quando comparado ao cenário 1G2G tradicional. Em contrapartida, a adição de uma unidade que produz biometano apenas a partir da vinhaça a uma biorrefinaria 1G2G [cenário 1G2G+B(v)], gerou um aumento de 3,2% na receita. Além disso, foi observado um aumento do CAPEX nos cenários em que há produção de biometano devido à adição de uma nova unidade à biorrefinaria. No cenário 1G2G+B(v+C5), esse aumento foi maior que para o 1G2G+B(v), mesmo com a remoção da unidade de fermentação C5. Como consequência da queda na receita e aumento do CAPEX, o cenário em que o licor C5 é utilizado na produção de biometano apresentou a menor viabilidade econômica.

Por último, foram verificados os impactos ambientais da substituição do diesel fóssil pelo biometano nas operações de transporte de biomassa e no maquinário agrícola. Nos cenários 1G2G+B(v) e 1G2G+B(v+C5), houve a redução das emissões específicas do etanol em 22,2% e 19,9%, respectivamente, em relação ao cenário 1G2G, onde não há substituição do diesel fóssil. Além disso, pela aplicação da metodologia de ACV, foi possível observar que a etapa de produção da biomassa ainda é a que representa o maior impacto sobre as emissões totais do etanol, devido, principalmente, à utilização de fertilizantes.

Assim, os resultados obtidos indicam que a produção de biometano em biorrefinarias de cana-de-açúcar 1G2G é uma alternativa economicamente viável para o aproveitamento de

insumos com baixa conversão em etanol, como o licor C5, bem como de resíduos, como a vinhaça. Apesar do aumento nos custos de investimento e, no caso do cenário 1G2G+B(v+C5), da queda na receita, a inclusão da unidade de biometano oferece oportunidades para a diversificação das fontes de receita, fortalecendo o conceito de biorrefinaria, e para a redução de GEE associados à produção do etanol. Essa medida pode levar à melhora da competitividade em relação ao seu equivalente fóssil, a gasolina, especialmente quando questões como créditos de carbono são consideradas.

Por fim, com base nas premissas adotadas neste estudo, conclui-se que o cenário 1G2G+B(v) é o mais interessante, pois oferece uma redução significativa nas emissões do etanol e um atrativo resultado econômico. Contudo, a utilização do licor C5 para a produção de biometano gera um maior aproveitamento desta corrente em comparação com a produção de etanol 2G. Portanto, a investigação de rotas alternativas para o aproveitamento do licor C5, do ponto de vista técnico-econômico e ambiental, é essencial para a tomada de decisão no projeto de cenários de biorrefinaria e deve ser ainda mais aprofundada.

REFERÊNCIAS

- ADARME, O. F. H.; BAÊTA, B. E. L.; GABRIEL FILHO, J. B.; GURGEL, L. V. A.; AQUINO, S. F. Use of anaerobic co-digestion as an alternative to add value to sugarcane biorefinery wastes. **Bioresource Technology**, v. 287, n. 1, p. 121443-121465, 2019.
- AGARWAL, N. K.; KUMAR, M.; GHOSH, P.; KUMAR, S. S.; SINGH, L.; VIJAY, V. K.; KUMAR, K. Anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production and digestate valorization. **Chemosphere**, v. 295, n. 1, p. 133893-133906, 2022.
- AGBOR, V. B.; CICEK, N.; SPARLING, R.; BERLIN, A.; LEVIN, D. B. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 1, p. 675-685, 2011.
- ALLEGUE, L. B.; HINGE, J. H. **Biogas Upgrading: Evaluation Methods for H₂S Removal**. Dinamarca: Danish Technological Institute, 2014.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017**. 2017. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-685-2017>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. RenovaCalc. **Ministério de Minas e Energia**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>. Acesso em: 28 abr. 2023.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 906, de 18 de novembro de 2022 - DOU DE 24-11-2022**. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20as%20especifica%C3%A7%C3%B5es%20do,em%20todo%20o%20territ%C3%B3rio%20nacional..> Acesso em: 25 abr. 2023.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Informações auxiliares ao cumprimento do Decreto 10.634/2021 - Preços médios regionais de gás natural sem impostos. **Ministério de Minas e Energia**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/acompanhamento-do-mercado-de-gas-natural/informacoes-auxiliares-ao-cumprimento-do-decreto-10-634-2021-precos-medios-regionais-de-gas-natural-sem-impostos>. Acesso em: 05 mar. 2023.
- AWE, O. W.; ZHAO, Y.; NZIHOU, A.; MINH, D. P.; LYCZKO, N. A Review of Biogas Utilization, Purification and Upgrading Technologies. **Waste Biomass Valorization**, v. 8, n. 1, p. 267–283, 2017.

BONOMI, A.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; LIMA, M. A. P. **Virtual Biorefinery: An Optimization Strategy for Renewable Carbon Valorization**. 1 ed. Suíça: Springer International Publishing, 2016.

BRESSANIN, J. M.; KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; WATANABE, M. D. B.; SAMPAIO, I. L. M.; BONOMI, A.; MORAIS, E. R.; CAVALETT, O. Techno-Economic and Environmental Assessment of Biomass Gasification and Fischer–Tropsch Synthesis Integrated to Sugarcane Biorefineries. **Energies**, v. 13, n. 17, p. 4576-4598, 2020.

CARBOTECH. Carbon Molecular Sieves (CMS). **CarboTech**, 2023. Disponível em: <https://www.carbotech.de/en/applications/carbon-molecular-sieves-cms/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

CARDOSO, T. F.; WATANABE, M. D. B.; SOUZA, A.; CHAGAS, M. F.; CAVALETT, O.; MORAIS, E. R.; NOGUEIRA, L. A. H.; REGIS, M.; LEAL, L. V.; BRAUNBECK, O. A.; CORTEZ, L. A. B.; BONOMI, A. Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. **Biofuels, bioproducts and biorefining**, v. 12, n. 1, p. 68-82, 2017.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Acervo CCEE. **CCEE**, 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/acervo-ccee?especie=38753&assunto=39056&keyword=consolidado&periodo=1825>. Acesso em: 05 mar. 2023.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Consulta ao banco de dados do site. **CEPEA**, 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx>. Acesso em: 05 mar. 2023.

CHEBBI, R.; QASIM, M.; JABBAR, N. A. Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas. **Energy Reports**, v. 5, n. 1, p. 723-732, 2019.

COLTRO, L. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV. In: COLTRO, L. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

COMEX STAT. Exportação e Importação Geral. **Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços**, 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx>. Acesso em: 05 mar. 2023.

CURRAN, M. A. **Environmental Life-Cycle Assessment**. 1 ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1996.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Sources: An Introduction**. 1 ed. Alemanha: Wiley-VCH, 2008.

DIAS, M. O. S.; CAVALETT, O.; MACIEL FILHO, R. M.; BONOMI, A. Integrated first-and second-generation processes for bioethanol production from sugarcane. In: **Sugarcane-Based Biofuels and Bioproducts**. Estados Unidos da América: Wiley Blackwell, 2016.

ELIHIMAS, D. R. M. Avaliação técnico-econômica e ambiental do uso de biogás produzido a partir de vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar. **Dissertação de Mestrado** (Curso de Pós-graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2021. 102p.

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. F.; KOYAMA, M. H.; ARAÚJO JÚNIOR, M. M.; ZAIAT, M. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**, v. 89, n. 1, p. 245-252, 2016.

FORMANN, S.; HAHN, A.; JANKE, L.; STINNER, W.; STRÄUBER, H.; LOGROÑO NIKOLAUSZ, M. Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities Through Sugarcane Residues. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, n. 5, p. 579577- 579598, 2020.

GONÇALVES, A.; NEVES, C.; CALÔBA, G.; NAKAGAWA, M.; MOTTA, R. R.; COSTA, R. P. **Engenharia Econômica e Finanças**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops & Products**, v. 129, n. 1, p. 201-205, 2019.

GREENE, P. Basics of Biogas Upgrading. **BioCycle**, 2018. Disponível em: <https://www.biocycle.net/basics-biogas-upgrading/>. Acesso em: 29 dez. 2022.

HOARAU, J.; CARO, Y.; GRONDIN, I.; PETIT, T. Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. *Journal of Public Policies Formulation in Bioenergy*. **Industrial Biotechnology**, v. 12, n. 1, p.62-67, 2016.

IEA - AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **CO₂ Emissions in 2022**. Paris: IEA, 2023.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Estados Unidos da América: Cambridge University Press, 2013.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Estados Unidos da América: Cambridge University Press, 2022.

JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. The Virtual Sugarcane Biorefinery – A Simulation Tool to Support Analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 50, p. 1-12, 2017.

JUNQUEIRA, T. L.; CHAGAS, M. F.; GOUVEIA, V. L. R.; REZENDE, M. C. A. F.; WATANABE, M. D. B.; JESUS, C. D. F.; CAVALETT, O.; MILANEZ, A. Y.; BONOMI, A. Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 50, p. 1-12, 2017.

KAPOOR, R.; GHOSH, P.; TYAGI, B.; VIJAY, V. K.; VIJAY, V.; THAKUR, I. S.; KAMYAB, H.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, A. Advances in biogas valorization and utilization systems: a comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, n. 1, p. 123052-123067, 2020.

KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; REZENDE, M. C. A. F.; CARDOSO, T. F.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. **Applied Energy**, v. 209, n. 1, p. 290-305, 2018.

KLEIN, B. C.; SAMPAIO, I. L. M.; MANTELATTO, P. E.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Beyond ethanol, sugar, and electricity: a critical review of product diversification in Brazilian sugarcane mills. **Biofuels, Bioproducts, Biorefining**, v. 13, n. 3, p. 809-821, 2019.

LABORATÓRIO NACIONAL DE BIORRENOVÁVEIS. Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar. **LNBR**, 2023. Disponível em: <https://lnbr.cnpem.br/instalacoes-abertas/biorrefinaria-virtual/>. Acesso em: 25 jan. 2023.

LEME, R. M.; SEABRA, J. E. Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. **Energy**, v. 119, n. 1, p. 754-766, 2017.

LIEW, W. H.; HASSIM, M. H.; NG, D. K. S. Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 71, n. 1, p. 11-29, 2014.

LIMA, D. R. S.; PARANHOS, A. G. O.; ADARME, O. F. H.; BAÊTA, B. E. L.; GURGEL, L. V. A.; SANTOS, A. S.; SILVA, S. W.; AQUINO, S. F. Integrated production of second-generation ethanol and biogas from sugarcane bagasse pretreated with ozone. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 1, p. 809-825, 2022.

MANDEGARI, M. A.; FARZAD, S.; GÖRGENS, J. F. Recent trends on techno-economic assessment (TEA) of sugarcane biorefineries. **Biofuel Research Journal**, v. 15, n. 3, p. 704-712, 2017.

MARIANO, A. P.; DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CUNHA, M. P.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Utilization of pentoses from sugarcane biomass: Techno-economics of biogas vs. butanol production. **Bioresource Technology**, v. 142, n. 1, p. 390-399, 2013.

MILANEZ, A. Y., NYKO, D., VALENTE, M. S., SOUSA, L. C., BONOMI, A., JESUS, C. D. F., WATANABE, M. D. B., CHAGAS, M. F., REZENDE, M. C. A. F., CAVALETT, O., JUNQUEIRA, T. L., GOUVÊIA, V. L. R. 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**, v. 41, n. 1, p. 237-294, 2015.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Renovabio: Política Nacional de Biocombustíveis. Consulta Pública - Anexo da Nota Técnica nº 12/2018/DBIO/SPG: Proposta de Metas Compulsórias Anuais de Redução de Emissões na Comercialização de Combustíveis.** Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=40d35ad0-582d-82e3-1de0-61979c5905ae&groupId=36224. Acesso em: 05 mar. 2023.

MORAES, B. A.; JUNQUEIRA, T. L.; PAVANELLO, L. G.; CAVALLET, O.; MANTELATTO, P. E.; BONOMI, A.; ZAIAT, M. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, n. 1, p. 825-835, 2014.

MOREIRA, L. C.; BORGES, P. O.; CAVALCANTE, R. M.; YOUNG, A. F. Simulation and economic evaluation of process alternatives for biogas production and purification from sugarcane vinasse. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, n. 1, p. 112532-112558, 2022.

NEWNAN, D. G.; ESCHENBACH, T. G.; LAVELLE, J. P. **Engineering Economic Analysis**. 9 ed. Estados Unidos da América: Oxford University Press, 2004.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CHAGAS, M. F.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Methane emissions from sugarcane vinasse storage and transportation systems: Comparison between open channels and tanks. **Atmospheric Environment**, v. 159, n. 1, p. 135-146, 2017.

PAQUES. THIOPAQ® - Tratamento de Gás e Geração de Biogás. **Paques**, 2023. Disponível em: <https://br.paques.nl/produtos/featured/thiopaq-tratamento-de-gas-biogas>. Acesso em 29 dez. 2022.

PAULOSE, P.; KAPARAJU, P. Anaerobic mono-digestion of sugarcane trash and bagasse with and without pretreatment. **Industrial Crops and Products**, v. 170, n. 1, p. 113712 – 113725, 2021.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineering Handbook**. 7 ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1997.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; WEST, R. E. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5 ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 2003.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. 1 ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

RABELO, S. C.; CARRERE, H.; MACIEL FILHO, R.; COSTA, A. C. Production of ethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 7887-7895, 2011.

RIBEIRO, F. R.; PASSOS, F.; GURGEL, L. V. A.; BAÊTA, B. E. L.; AQUINO, S. F. Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. **Science of the Total Environment**, v. 584-585, n. 15, p. 1108-1113, 2017.

SADHUKHAN, J.; NH, K. S.; MARTINZEZ, E.H. **Biorefineries and Chemical Processes**. 1 ed. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2014.

SINGH, S. P.; JAWAID, M.; CHANDRASEKAR, M.; SENTHILKUMAR, K.; YADAV, B.; SABA, N.; SIENGCHIN, S. Sugarcane wastes into commercial products: Processing methods, production optimization and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 328, n. 1, p. 129453-129467, 2021.

SOUZA, M. E.; FUZARO, G.; POLEGATO, A. R. Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. **Water Science & Technology**, v. 25, n. 7, p. 213-222, 1982.

THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: environmental management—life cycle assessment—principles and framework**. Genebra, 2006a.

THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines**. Genebra, 2006b.

TURTON, R.; SHAEIWITZ, J. A.; BHATTACHARYYA, D.; WHITING, W. B. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 5 ed. Estados Unidos da América: Pearson Education, 2018.

URBAN, W.; GIROD, K.; LOHMANN, H. **Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz**. Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT, 2008.

VELVIZHI, G.; BALAKUMAR, K.; SHETTI, N. P.; AHMAD, E.; PANT, K. K.; AMINABHAVI, T. M. Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. **Bioresource Technology**, v. 343, n. 1, p. 126151-126163, 2022.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 1, p. 1218–1230, 2016.

YU, Y.; WU, J.; REN, X.; LAU, A.; REZAEI, H.; TAKADA, M.; BI, X.; SOKHANSANJ, S. Steam Explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 154, n. 1, p. 11871 – 11890, 2022.