

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

LUÍSA PEREIRA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO
INTEGRADA DE BIOETANOL 1G E 2G EM BIORREFINARIA DE CANA
UTILIZANDO LEVEDURA RECOMBINANTE**

Itajubá, MG
2022

LUÍSA PEREIRA PINHEIRO

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO
INTEGRADA DE BIOETANOL 1G E 2G EM BIORREFINARIA DE CANA
UTILIZANDO LEVEDURA RECOMBINANTE**

Texto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof^a Dr^a Thais Suzane Milessi Esteves

Coorientadora: Dr^a Andreza Aparecida Longati de Oliveira

Itajubá, MG
2022

RESUMO

Com o aumento mundial da demanda energética e da preocupação mundial com as mudanças climáticas do planeta, estímulos à pesquisa e ao desenvolvimento de processos de produção de biocombustíveis, como o etanol, cresceram nas últimas décadas, visando a utilização integral da biomassa e geração mínima de resíduos. Para que seja possível a implementação da tecnologia 2G nas biorrefinarias brasileiras 1G, estudos com avaliações econômicas e ambientais são fundamentais para identificar possíveis gargalos processuais e auxiliar na tomada de decisões. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise técnico-econômica (ATE) e avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de etanol em uma biorrefinaria que integra a tecnologia 1G e 2G a partir da cana-de-açúcar e seus resíduos. Para isso, três cenários foram avaliados: o Cenário I que representa uma destilaria autônoma brasileira, enquanto os Cenários II e III apresentam uma tecnologia integrada 1G2G abordando diferentes tipos de pré-tratamento (ácido e hidrotérmico) e utilizando levedura recombinante na etapa de fermentação. As simulações dos cenários foram realizadas no *software* EMSO enquanto a ACV foi realizada no *software* SimaPro®. O processo integrado aumentou a produção de etanol em 14% no Cenário II e 16% no Cenário III em comparação ao Cenário I. Os processos integrados (Cenários II e III) apresentaram elevados custos de produção, ocasionando em um preço mínimo de venda do etanol maior que o valor comercializado do etanol em torno de 31% para o Cenário II (693,59 US\$/m³) e 48% para o Cenário III (785,47 US\$/m³), tornando os processos inviáveis do ponto de vista econômico. Na análise ambiental, constatou-se que ambos os Cenários não apresentaram potencial necessário para mitigar os impactos ambientais do processo de produção de etanol 1G2G em relação ao Cenário I, de forma a obter todas as categorias de impacto ambiental inferiores ou próximas ao Cenário I. Os resultados obtidos indicaram a necessidade da seleção de outros processos de produção de etanol a fim de melhorar a integração de processos nas biorrefinarias a base de cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: Biorrefinaria, avaliação técnico-econômica, avaliação ambiental, etanol, produção integrada de etanol de primeira e segunda geração.

ABSTRACT

With the global increase in energy demand and global concern with climate change on the planet, incentives for research and development of biofuel production processes, such as ethanol, have grown in recent decades, aiming at the full use of biomass and the minimum generation of waste. In order to make possible the implementation of 2G technology in Brazilian 1G biorefineries, studies with economic and environmental assessments are essential to identify possible procedural bottlenecks and help in decision-making. Thus, the main objective of this work was to carry out a technical-economic analysis (TEA) and life cycle assessment (LCA) of ethanol production in a biorefinery that integrates 1G and 2G technology from sugarcane and its waste. For this, three scenarios were evaluated: Scenario I which represents an autonomous Brazilian distillery, while Scenarios II and III present an integrated 1G2G technology addressing different types of pre-treatment (acid and hydrothermal) and using recombinant yeast in the fermentation step. Scenario simulations were performed using the EMSO software, while the LCA was performed using the SimaPro® software. The integrated process increased ethanol production by 14% in Scenario II and 16% in Scenario III compared to Scenario I. The integrated processes (Scenarios II and III) had high production costs, resulting in a minimum selling price of ethanol greater than the marketed value of ethanol around 31% for Scenario II (693.59 US\$/m³) and 48% for Scenario III (785.47 US\$/m³), which made the processes unfeasible from the point of view economic. In the environmental analysis, both Scenarios did not have the necessary potential to mitigate the environmental impacts of the 1G2G ethanol production process in relation to Scenario I, in order to obtain all categories of environmental impact lower or close to Scenario I. The obtained results indicated the need to select other ethanol production processes as a way to improve the integration of processes in sugarcane-based biorefineries.

KEYWORDS: Biorefinery, technical-economic evaluation, environmental evaluation, ethanol, integrated production of first- and second-generation ethanol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo final mundial no ano de 2018 (A) por setor e (B) por fonte.....	13
Figura 2 - Possibilidades de conversão de biomassa em uma biorrefinaria utilizando as rotas bioquímica e termoquímica	15
Figura 3 - Etapas de produção de etanol a partir de diferentes biomassas	17
Figura 4 - Estrutura da biomassa lignocelulósica.....	20
Figura 5 - Estrutura da celulose.....	21
Figura 6 - Estrutura da hemicelulose.....	22
Figura 7 - Estrutura da lignina.....	23
Figura 8 - Bagaço e palha da cana-de-açúcar.....	24
Figura 9 - Efeito do pré-tratamento nos materiais lignocelulósicos.....	25
Figura 10 - Geração de inibidores a partir da hidrólise dos materiais lignocelulósicos.....	28
Figura 11 - Vias metabólicas da xilose.....	30
Figura 12 - Produção de açúcar e etanol 1G.....	33
Figura 13 - Processo integrado 1G2G.....	35
Figura 14 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida	39
Figura 15 - Fluxograma da biorrefinaria integrada 1G2G proposta no presente trabalho	45
Figura 16 – Principais elementos de uma TEA de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar	49
Figura 17 - Fluxograma do Cenário I desenvolvido por Longati (2018)	54
Figura 18 – (A) Produtividade de etanol dos cenários avaliados. (B) Composição do combustível da caldeira em função da vazão [kg/h]. (C) Eletricidade total e excedente produzida nas unidades industriais.....	61
Figura 19 - Custo de investimento da unidade industrial do Cenário II.....	64
Figura 20 - Custo operacional da unidade industrial do Cenário II.....	66
Figura 21 – Resultados da ACV dos dois cenários avaliados	69
Figura 22 - (A) Produtividade de etanol nos cenários avaliados. (B) Geração de energia elétrica nas unidades industriais. (C) Vapor consumido na planta. (D) Combustíveis da caldeira em relação a vazão [kg/h].	72
Figura 23 - Capital de investimento da biorrefinaria 1G2G do Cenário III.....	75
Figura 24 - Custo operacional total do Cenário III.....	76
Figura 25 - Indicadores de impacto ambiental nos cenários avaliados na produção de etanol 1G2G	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gerações de etanol: fontes, processos, vantagens e desvantagens	19
Tabela 2 - Lista de componentes da biorrefinaria	43
Tabela 3 - Composição das matérias-primas utilizadas na biorrefinaria.....	44
Tabela 4 - Principais parâmetros econômicos assumidos para a ATE	49
Tabela 5 - Categorias de impacto do método CML Baseline 2000.....	52
Tabela 6 - Parâmetros utilizados na simulação da biorrefinaria de cana-de-açúcar desenvolvida por Longati (2018).....	55
Tabela 7 - Principais inventários utilizados na ACV do Cenário I	56
Tabela 8 - Parâmetros utilizados na simulação da etapa 2G da biorrefinaria do Cenário II	57
Tabela 9 - Principais inventários utilizados para ACV no Cenário 2.....	58
Tabela 10 - Principais parâmetros técnicos do pré-tratamento hidrotérmico	59
Tabela 11 - Principais inventários utilizados para ACV no Cenário 3.....	59
Tabela 12 – Custos diretos fixos da planta nos casos base.....	62
Tabela 13 - Custo operacional da unidade industrial nos cenários avaliados (US\$ * 106).....	65
Tabela 14 – Custo das matérias-primas nos setores dos cenários avaliados	67
Tabela 15 – Saídas da produção de etanol e eletricidade, e fatores de alocação energética nos cenários avaliados.....	68
Tabela 16 - Composição do hidrolisado após a etapa de pré-tratamento da biomassa	72
Tabela 17 - Principais parâmetros da unidade industrial e os investimentos industrial na aquisição de equipamentos, suas instalações e tubulações, entre outros.....	73
Tabela 18 - Custo de matéria-prima dos cenários avaliados no setor de pré-tratamento	77
Tabela 19 - Saídas da produção de etanol e eletricidade, e fatores de alocação energética nos dois cenários avaliados.	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 BIOENERGIA, BIORREFINARIAS E BIOETANOL	13
3.2 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA	19
3.3 POTENCIAIS BIOMASSAS – BAGAÇO E PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR	23
3.3.1 Pré-tratamento ácido	27
3.3.2 Produção de etanol 2G	28
3.4 INTEGRAÇÃO 1G2G	32
3.5 AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA (ATE)	36
3.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL	38
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS	42
4.1.1 Simulador EMSO	42
4.1.2 SimaPro®	42
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	43
4.2.1 Lista de componentes	43
4.2.2 Composição da Matéria-Prima	44
4.2.3 Descrição da produção de etanol na biorrefinaria	44
4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL	48
4.3.1 Avaliação Econômica	48
4.3.2 Avaliação Ambiental	51
4.3.3 Cenários estudados	53
4.3.3.1 Cenário I	53
4.3.3.2 Cenário II	56
4.3.3.3 Cenário III	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS BIORREFINARIAS 1G E 1G2G (CENÁRIOS I E II)	60
5.1.2 Análise técnico-econômica	60
5.1.3 Avaliação ambiental	68
5.2 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES PRÉ-TRATAMENTOS DA BIOMASSA PARA A BIORREFINARIA 1G2G (CENÁRIOS II E III)	70
5.2.1 Análise técnico-econômica	70

5.2.3 Avaliação ambiental	78
6 CONCLUSÕES.....	81
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE	93

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a queima de combustíveis fósseis é uma das atividades que mais gera emissões de gases de efeito estufa (GEE), provocando significativas mudanças climáticas no planeta, as quais levam à necessidade da transição da matriz energética mundial para fontes mais sustentáveis. O Brasil tem como meta reduzir suas emissões de GEE em até 66,49 milhões de toneladas em 2025 e 90,67 milhões de toneladas até o ano de 2030 (BRASIL, 2021). Neste contexto, intensificou-se o estímulo para a produção de biocombustíveis como forma de substituição dos combustíveis fósseis devido às suas vantagens ambientais e socioeconômicas (MILESSI, 2017).

Desde a década de 70, as políticas nacionais estimularam a produção de etanol de primeira geração (1G) em larga escala a partir da cana-de-açúcar, o que a tornou a principal matéria-prima produtora do combustível no país (OLIVEIRA, 1982). Dessa forma, os investimentos realizados em mecanização e treinamento de mão-de-obra, aliados ao reaproveitamento dos resíduos da produção sucroenergética e a redução e reuso de água desenvolveram de forma significativa o setor sucroenergético (BRITTO, 2020).

As biorrefinarias integram diversos processos de conversão de biomassa em biocombustíveis, insumos químicos, materiais, alimentos, calor, rações e energia (SANTOS; RUZENE; SILVA, 2017), visando a utilização total da biomassa, a geração mínima de resíduos e o uso do modelo de economia circular. A economia circular é o modelo baseado na redução, reutilização, recuperação e reciclagem das matérias primas e energia, cujo objetivo é melhorar o uso dos recursos naturais (MENA, 2016). Assim, no contexto de biorrefinaria, a economia circular além de reutilizar os resíduos e subprodutos da produção sucroenergética, como o bagaço e a palha da cana, torta de filtro e a vinhaça, agrega valor não só econômico, como também social e ambiental a estes materiais (BRITTO, 2020).

A biorrefinaria, além de reduzir impactos ambientais e utilizar integralmente sua biomassa e seus subprodutos, promove maior segurança energética, auxilia na mitigação das mudanças climáticas, gera desenvolvimento econômico rural e alavanca o setor industrial brasileiro (AGOSTINHO; ORTEGA, 2013; OLIVEIRA, 2016).

O bagaço e a palha da cana-de-açúcar são os subprodutos lignocelulósicos mais abundantes das indústrias sucroalcooleiras, demonstrando grande potencial energético em suas estruturas para a produção de etanol e outros produtos de interesse à sociedade. Entretanto, para

se obter um sistema economicamente viável e sustentável é necessário utilizar de forma eficiente todas as frações desta matéria-prima, incluindo a celulose, a hemicelulose e a lignina, elementos que compõem a estrutura lignocelulósica da biomassa (MILESSI, 2017; SANTOS et al., 2012).

Uma das maneiras de aproveitar esses componentes contidos na biomassa lignocelulósica é através do seu uso como matéria-prima para a produção de etanol, denominado etanol de segunda-geração (2G) (OLIVEIRA; NUNES; SOUSA, 2020). Para que a produção de etanol 2G seja factível, é necessário a utilização de todos os açúcares contidos na biomassa, tanto as hexoses advindas da parte celulósica como as pentoses advindas da parte hemicelulósica (MILESSI, 2017). A levedura *Saccharomyces cerevisiae* é a mais utilizada para a produção de etanol a partir de hexoses, entretanto, na sua forma selvagem, não é capaz de fermentar a pentose xilose à etanol (MILESSI, 2017; SANTOS et al., 2012). Desta forma, para a conversão da xilose em etanol, há basicamente duas alternativas: as rotas *ex-vivo* e *in-vivo*. Na rota *ex-vivo*, a xilose é convertida no isômero xilulose, assimilado por linhagens selvagens de *S. cerevisiae*. Esta reação reversível de isomerização é catalisada pela enzima xilose isomerase (E.C. 5.3.1.5). Porém limitações termodinâmicas relacionadas com o equilíbrio da reação, assim como limitações bioquímicas devido às diferenças de pH e temperatura ótimas da enzima e da levedura ainda impedem a sua aplicação industrial. Adicionalmente, têm-se o alto custo das enzimas envolvidas no processo (MILESSI, 2017).

A rota *in-vivo*, mais popular atualmente, utiliza linhagens de *S. cerevisiae* geneticamente modificadas capazes de assimilar diretamente xilose (JO et al., 2016). Linhagens de leveduras naturalmente fermentadoras de xilose, como *Kluyveromyces marxianus*, *Scheffersomyces shehatae* e *Scheffersomyces stipitis*, constituem uma alternativa às linhagens recombinantes. Contudo, essas espécies costumam apresentar baixa produtividade e rendimento em etanol, além de menor tolerância a condições encontradas no ambiente fermentativo, como variações de pH (ROBAK; BALCEREK, 2018). Por essa razão, diversas linhagens de leveduras capazes de fermentar eficientemente as pentoses presentes nos hidrolisados e com tolerância aos inibidores dos hidrolisados têm sido desenvolvidas buscando-se encontrar uma levedura robusta para aplicação em um processo escalonável (PEREZ et al., 2022).

Conforme abordado por Milessi et al. (2020a) hidrolisados ricos em xilose são suscetíveis à contaminação por bactérias devido à lenta assimilação deste açúcar pelas leveduras. Neste sentido, estudos sugerem que a co-fermentação de hexoses e pentoses, como

glicose e xilose, pode ser uma estratégia promissora pois as hexoses são assimiladas com velocidades em torno de 10 vezes maiores (MILESSI et al., 2020a), permitindo que altas concentrações de etanol sejam alcançadas rapidamente e minimizando o risco de contaminação. Além disso, a presença de hexoses no meio pode aumentar a velocidade de consumo de pentoses pelas leveduras (NIELSEN et al., 2017), possibilitando um aumento de produtividade em etanol a partir de xilose.

Adicionalmente, a integração entre os processos de produção de etanol 1G e 2G é crucial para viabilizar a adoção da tecnologia de produção de etanol 2G pelas usinas. No caso do Brasil, o melaço, rico em sacarose, tradicionalmente empregado na produção de etanol 1G (DELLABIANCA et al., 2013) é a escolha natural para a co-fermentação com hidrolisados lignocelulósicos. O melaço é previamente diluído, devido à alta concentração de açúcares. A substituição da água diluente do melaço pelo hidrolisado hemicelulósico da biomassa (fração líquida) mitigaria os efeitos negativos dos inibidores dos hidrolisados sobre os microrganismos, além de prover açúcares adicionais geralmente subutilizados (pentoses) ao processo. A mistura entre melaço e hidrolisado, além de contribuir para a integração dos processos de produção de etanol 1G2G, minimiza o risco de contaminação devido ao rápido aumento na concentração de etanol resultante da eficiente assimilação de glicose e frutose (MARQUES et al., 2015).

Neste sentido, Perez et al. (2022) estudaram o processo integrado de produção de etanol 1G2G pela mistura de melaço com hidrolisado hemicelulósico ácido bruto de bagaço de cana, como forma de obter um meio fermentativo industrial, sem a utilização de processos de concentração e destoxificação do hidrolisado hemicelulósico para a produção de etanol. Este processo utilizou uma levedura recombinante de alta performance *S. cerevisiae* MDS130 desenvolvida pelo grupo do Prof. Johan Thevelein (NovelYeast, Bélgica), imobilizada em esferas de gel de alginato de cálcio em um biorreator de leito fixo operando em bateladas repetidas. Os autores obtiveram uma eficiência notável no processo, realizando vinte bateladas repetidas com produtividades de etanol próximas de 20 g/L/h, a qual é diretamente comparável a produção de etanol 1G. Porém, apesar do processo robusto, e escalonável desenvolvido, a análise de sua viabilidade técnico-econômica e ambiental (ATEA) é mandatória para sua implementação em escala industrial.

Desta forma, este projeto de mestrado propôs realizar a ATEA do processo integrado desenvolvido por Perez et al. (2022) para a produção de etanol 1G2G baseado na co-fermentação de hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar e melaço utilizando

levedura recombinante de alta performance visando identificar sua viabilidade econômica e ambiental, assim como realizar uma análise comparativa do processo integrado 1G2G com o processo convencional de produção de etanol 1G já aplicado industrialmente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação foi realizar a ATEA de um processo integrado 1G2G para a produção de etanol baseada na co-fermentação de hidrolisado hemicelulósico de bagaço da cana-de-açúcar e de melaço proveniente da produção de açúcar utilizando uma levedura recombinante de alta performance.

Objetivos específicos:

1. Realizar a ATE do processo integrado 1G2G baseado na mistura de melaço e hidrolisado hemicelulósico utilizando uma levedura recombinante de alta performance em diferentes cenários;
2. Realizar a análise de ciclo de vida (ACV) dos diferentes cenários do processo estudado para identificar os impactos ambientais;
3. Comparar os parâmetros econômicos e ambientais do processo integrado proposto com o processo tradicional de produção de etanol 1G descrito na literatura;

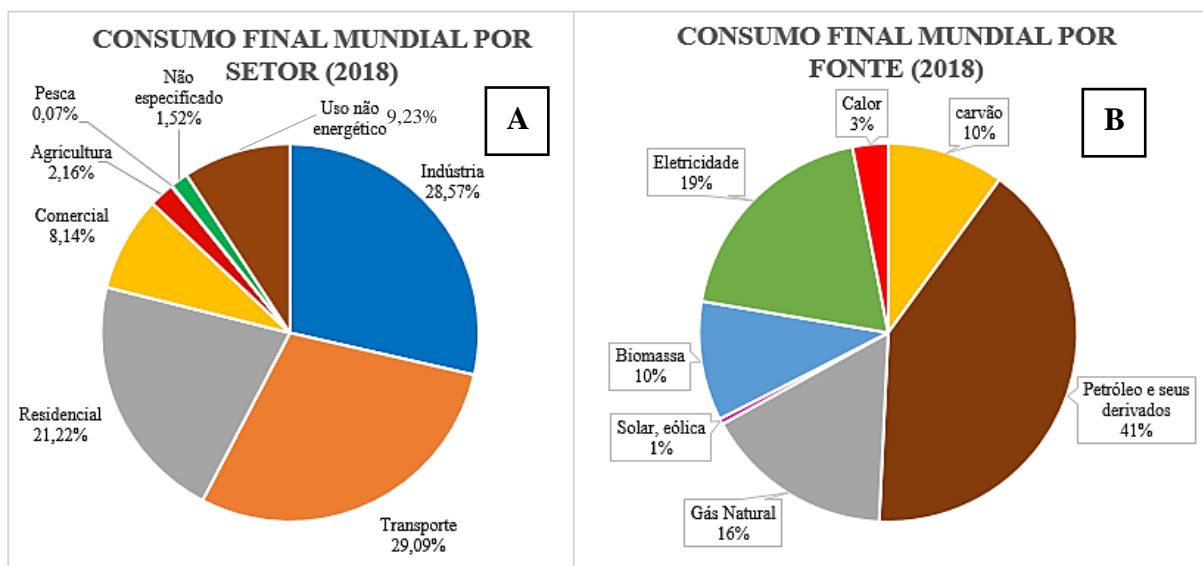
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BIOENERGIA, BIORREFINARIAS E BIOETANOL

A energia em suas inúmeras formas e transformações é considerada um dos pilares da sociedade, sendo responsável pela sobrevivência da humanidade, pelo desenvolvimento econômico e tecnológico de um país. A energia é usada desde eletrodomésticos, iluminação, transporte, sistemas de aquecimento e resfriamento até processos industriais para fornecer bens e serviços, suprir as necessidades e melhorar a qualidade de vida da população (KHANAL et al., 2010).

De acordo com os dados da *International Energy Agency* (IEA) no ano de 2018 o consumo global de energia cresceu 2,3%, quase o dobro da taxa média de crescimento desde 2010. Dentre os principais setores consumidores de energia no mundo (Figura 1A), o setor de transporte se destaca como o principal consumidor final (29,09% do consumo), seguido pelo setor industrial (28,57% do consumo). Considerando as fontes de energia (Figura 1B), destaca-se a predominância das fontes fósseis, responsável por aproximadamente 67% do setor. Como resultado dessa maior demanda de energia, as emissões globais de CO₂ aumentaram aproximadamente 1,7% em 2018, onde o setor de energia foi responsável por quase dois terços deste crescimento (IEA, 2019).

Figura 1 - Consumo final mundial no ano de 2018 (A) por setor e (B) por fonte

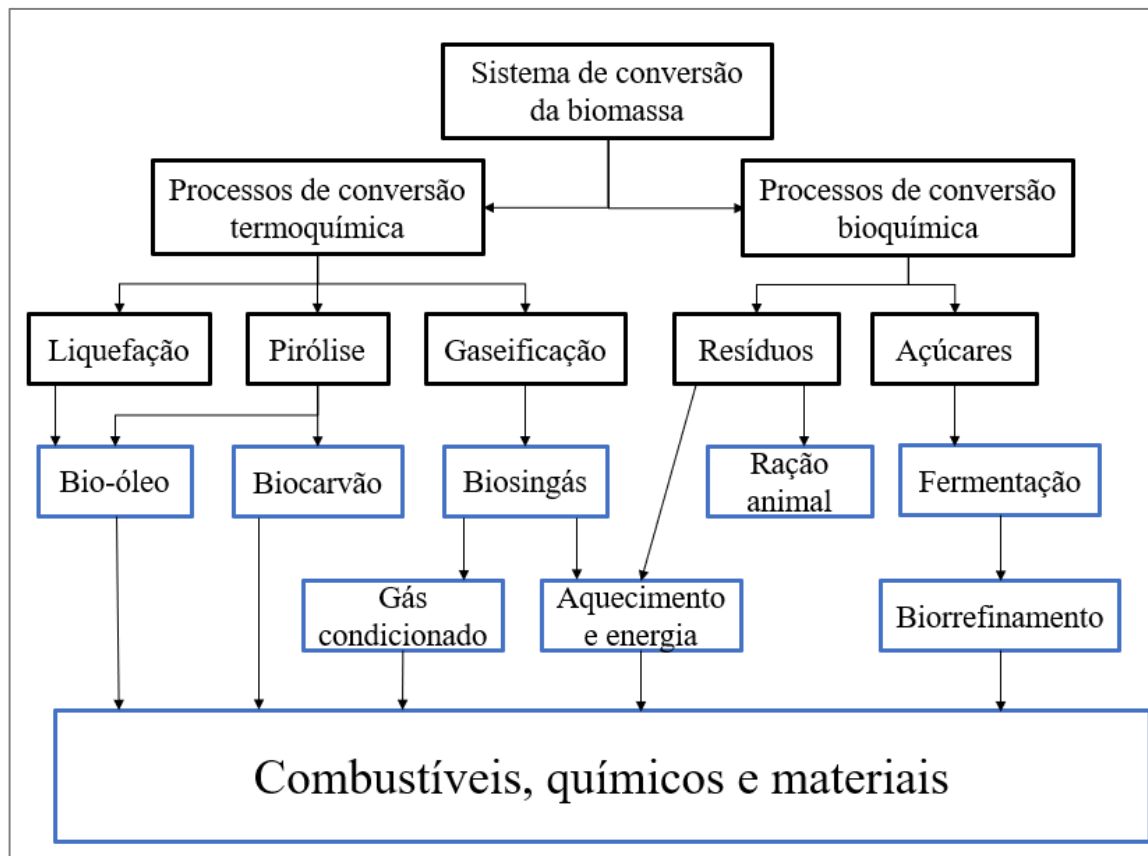


Fonte: Elaboração da autora.

Alguns fatores relacionados ao uso de combustíveis fósseis como o aumento das emissões de GEE e a flutuação dos preços dos combustíveis fósseis impulsionam a transição da matriz energética para fontes mais sustentáveis, incentivando a mudança do consumo dos combustíveis fósseis para os biocombustíveis (SARANGI; NANDA; MOHANTY, 2018). Com isso, a busca por novas fontes renováveis como forma de suprir o aumento da demanda energética e de matéria-prima impulsionou o interesse pela biomassa e o desenvolvimento do conceito de biorrefinaria (RODRIGUES, 2011). A biomassa é uma das fontes alternativas encontradas com grande potencial energético para atender os desafios de sustentabilidade, sendo definida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) como uma fonte primária de energia não fóssil. Na matriz energética brasileira, a participação da biomassa representa 19,1% do fornecimento total de energia do país e 9,1% do fornecimento total de eletricidade. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) e a EPE (2021) o cenário brasileiro tem projeções para utilização da biomassa no setor de geração de eletricidade e na expansão da oferta interna de biocombustíveis, como o etanol (MME, 2021).

A biomassa consiste em matéria orgânica, tanto de origem animal como vegetal, que contém energia armazenada sob a forma de energia química (EPE, 2021). Biorrefinaria é definida como uma unidade industrial que integra os processos e equipamentos capazes de converter a biomassa em produtos químicos, energia, calor e diversos combustíveis, visando o aproveitamento da biomassa em sua totalidade. Assim, quanto maior for o grau de integração do sistema da biorrefinaria, maior o potencial do processo em ser econômico, sustentável e viável ambientalmente. A Figura 2 representa as possibilidades de conversão da biomassa em uma biorrefinaria utilizando as rotas bioquímica e termoquímica (BASTOS, 2012; IEA, 2007).

Figura 2 - Possibilidades de conversão de biomassa em uma biorrefinaria utilizando as rotas bioquímica e termoquímica



Fonte: Adaptado de Alvim et al. (2014).

Atualmente, os biocombustíveis derivados da biomassa são considerados como os principais candidatos para a geração de energia renovável, especialmente para os combustíveis líquidos utilizados no setor de transporte (KHANAL et al., 2010). Apesar da implementação de usinas de materiais lignocelulósicos estarem em pesquisa e desenvolvimento, no Brasil, existem usinas como a Granbio e Raízen, que operam produzindo etanol 2G a partir de bagaço e palha da cana-de-açúcar. Impulsionam a aplicação da cana-de-açúcar em larga escala na produção de bioenergia, biocombustíveis e bioeletricidade, aplicando o conceito de biorrefinaria e economia circular, otimizando assim a produção de etanol e aumentando a produtividade da planta (RAMOS, 2020; SANTOS; TAVARES, 2022)

Neste contexto, o Brasil tem um destaque mundial, sendo pioneiro na produção de biocombustíveis, através do etanol de cana-de-açúcar, o qual tem sido produzido e usado desde

a década de 1920. Após a crise do petróleo em 1970, recebeu um incentivo para a expansão de sua produção por meio de políticas públicas, como o Proálcool – Programa Nacional do Álcool. Este programa tinha como objetivo diminuir a dependência do petróleo na matriz energética brasileira e desenvolver a indústria automotiva de forma que adaptassem os motores dos veículos para álcool (OLIVEIRA, 1982). Outro destaque brasileiro é a adição de etanol na gasolina. Essa adição, que atualmente corresponde a 27% da gasolina, traz algumas vantagens para o país, como uma gasolina com maior qualidade devido à alta octanagem do etanol e uma redução na emissão de GEE do combustível (GAMA, 2021; VASCONCELOS, 2015).

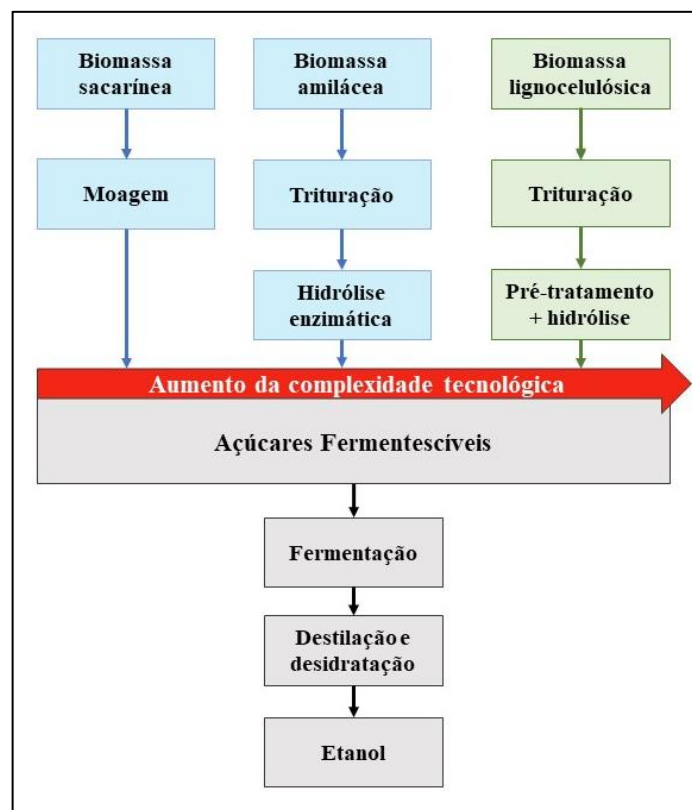
O etanol, também conhecido como álcool etílico, EtOH e bioetanol, com fórmula molecular C_2H_5OH , é um combustível incolor, líquido, de característica inflamável, com odor aromático, grande solubilidade em água e outros compostos orgânicos (STROHM, 2014). De acordo com Vasconcelos (2015), o etanol se solidifica a $-130\text{ }^\circ\text{C}$, evapora a $78,35^\circ\text{C}$ sob a pressão de 760 mmHg. Em $20\text{ }^\circ\text{C}$ sua densidade é 0,7893 g/mL e em 15°C é 0,7943 g/mL (VASCONCELOS, 2015). O etanol é um dos produtos químicos orgânicos usados em larga escala em insumos industriais e de consumo, sendo usado em diversos setores, desde a fabricação de medicamentos, plásticos, cosméticos até na forma de álcool carburante (SARANGI; NANDA; MOHANTY, 2018; STROHM, 2014).

Os açúcares fermentescíveis extraídos de diferentes fontes de biomassa podem ser fermentados para a produção de etanol principalmente através das seguintes etapas: extração, fermentação, separação e purificação. A extração é a etapa responsável pela obtenção dos açúcares fermentescíveis, que no caso da cana-de-açúcar passará por um processo de tratamento antes de ser direcionado a etapa de fermentação. A fermentação é um processo anaeróbico onde ocorre o consumo das moléculas de açúcar por ação de microrganismos até a formação de etanol e CO_2 . Dentre os microrganismos mais empregados para a obtenção do etanol por via fermentativa, tem-se a levedura *S. cerevisiae*, comumente utilizada no meio industrial para produção de bebidas alcoólicas e etanol combustível, devido a sua alta tolerância ao etanol. A etapa de separação e purificação são realizadas pela destilação e desidratação do etanol (MILESSI, 2017; YANG; LIU; ZHANG, 2007).

O bioetanol pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas e processos de produção, conforme demonstrado na Figura 3. O bioetanol 1G utiliza matérias-primas de base alimentar, sendo as fontes sacaríneas e amiláceas (ALVIM et al., 2014; RODRIGUES, 2011). As matérias-primas amiláceas, como o milho e trigo, precisam primeiramente da conversão do

amido em açúcares, etapa conhecida como hidrólise ou liquefação. Já nas matérias-primas sacaríneas, como a cana-de-açúcar, os açúcares já estão disponíveis na biomassa, sendo necessário realizar um processo de extração (MANOCHIO, 2014; RODRIGUES, 2011). No Brasil, a produção de etanol 1G utiliza principalmente a cana-de-açúcar como matéria-prima. Essa seleção ocorreu pelo fato de o país ser um grande produtor desta biomassa e dispor de tecnologias para transformá-la em etanol (FERREIRA, 2016; OLIVEIRA, 1982)

Figura 3 - Etapas de produção de etanol a partir de diferentes biomassas



Fonte: Adaptado de Milesi, 2017.

Conforme descrito anteriormente, o etanol 2G utiliza como matéria-prima a biomassa lignocelulósica não alimentícia, como os resíduos/subprodutos agrícolas. Alguns exemplos dessas matérias-primas são o bagaço e as palhas de cana-de-açúcar, milho, arroz e trigo, caule da mostarda, caule de algodão, casca do coco e capim-elefante (SARANGI; NANDA; MOHANTY, 2018). A tecnologia 2G, apesar de ainda estar em desenvolvimento para a larga escala, tem grande importância no cenário ambiental, por dar destino aos subprodutos e resíduos lignocelulósicos, aumentando significativamente a produção de etanol sem aumentar a exploração das terras cultiváveis. É importante ressaltar que a matéria-prima 2G encontra-se

em abundância no Brasil, tem grande disponibilidade e não compete com a indústria de alimentos. Para a produção de etanol 2G, é necessária uma etapa de pré-tratamento para liberar os açúcares fermentescíveis contidos na celulose e hemicelulose que compõem a biomassa, tornando o processo mais complexo quando comparado com a tecnologia 1G (ALE et al., 2019; MILESSI, 2017; RODRIGUES, 2011).

Existe ainda o etanol de terceira geração, que utiliza principalmente os organismos aquáticos, como as algas, como matéria-prima. Segundo Jambo et al. (2016) a utilização de algas apresenta algumas vantagens quando comparada as matérias-primas de primeira e segunda geração, como o fácil cultivo em diversos ambientes aquáticos com uso relativamente baixo da terra e alta absorção de carbono (CO_2). Outro fator importante que motiva a utilização da alga como matéria-prima de etanol é a composição desta biomassa que contém alto teor de lipídios e carboidratos e baixo teor de lignina e hemicelulose. Apesar das vantagens, essa tecnologia ainda apresenta desafios técnicos, como a desidratação da biomassa, tornando-se um desafio a sua produção com custos mais baixos e em escala industrial.

A tecnologia de quarta geração, segundo Saha et al. (2018), é o resultado do desenvolvimento da engenharia metabólica no campo da técnica de captura e armazenamento de carbono. Ale et al. (2019) definem a quarta geração de biocombustíveis como o processo que utiliza técnicas de bioengenharia para modificar o metabolismo e as propriedades das algas como forma de produção de combustíveis a partir de organismos fotossintéticos. Ziolkowska (2020) descreve a quarta geração de combustíveis como uma tecnologia em fase de desenvolvimento e experimentos em que a biomassa é geneticamente modificada para conter altas concentrações de celulose e baixa concentração de lignina (solucionando alguns problemas presentes na tecnologia 2G de biocombustíveis para torná-la mais sustentável), ou conter alto teor de óleo e maior capacidade de captura e armazenamento de carbono. A Tabela 1 realiza uma comparação entre as gerações de etanol, suas fontes, tecnologias de conversão, além de apresentar algumas vantagens e desvantagens de cada geração.

Tabela 1 - Gerações de etanol: fontes, processos, vantagens e desvantagens

Geração	Matéria-prima	Tecnologia de conversão	Vantagens	Desvantagens
Primeira	Alimentícia	Extração do açúcar, fermentação e destilação	Tecnologia simples e de baixo custo	Necessita de grandes terras para o cultivo
Segunda	Materiais lignocelulósicos (não alimentícia)	Pré-tratamento, hidrólise, fermentação, destilação	Utiliza resíduos como matéria-prima; não utiliza terras para cultivos	Necessita de tecnologias para realizar a conversão da biomassa em combustível para torná-la financeiramente acessível
Terceira	Algas e microalgas	Hidrólise, fermentação, destilação	Algas fáceis de cultivar; taxa alta de crescimento das algas; versátil: pode usar águas residuais, água do mar Alto rendimento devido ao alto teor de lipídeos nas algas; maior capacidade de captura de CO ₂	Maior consumo de energia para o cultivo de algas (mistura, filtração, centrifugação); custo elevado do fotobiorreator; problemas de contaminação de biomassa em sistema de lagoa aberta
Quarta	Algas e microalgas (modificados geneticamente)	Hidrólise, fermentação, destilação		Investimento inicial alto (tecnologia em desenvolvimento); pesquisa na fase inicial

Fonte: Adaptação de Dutta et al. (2014) e Jambo et al. (2016).

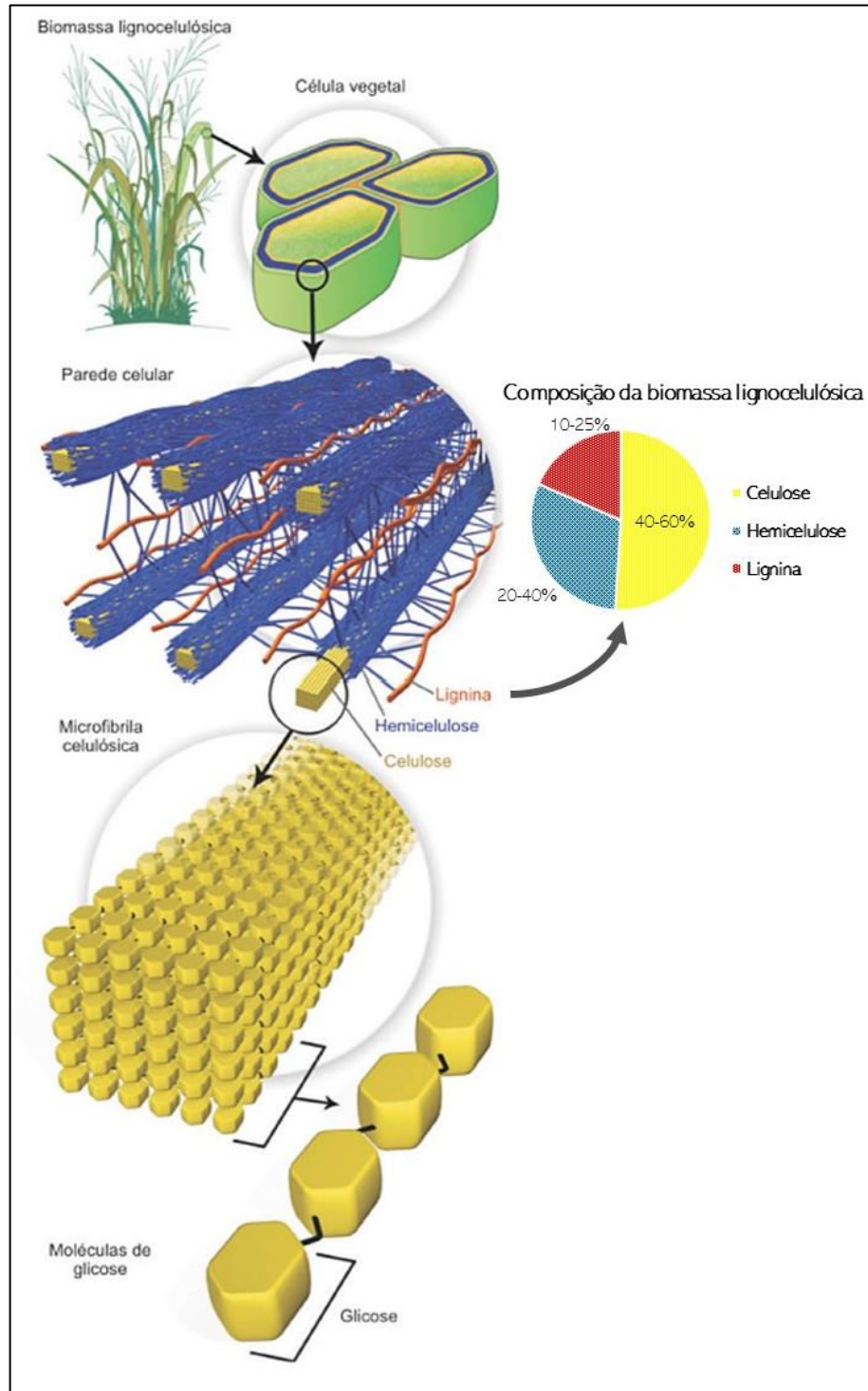
Neste sentido, considerando o nível tecnológico e os desafios ainda encontrados para a produção de etanol de terceira e quarta geração, o etanol 2G se destaca como um biocombustível potencial para auxiliar na transição energética da matriz nacional.

3.2 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

O aproveitamento energético dos materiais lignocelulósicos está relacionado com a sua constituição. Os principais componentes da biomassa são a celulose, hemicelulose e lignina (Figura 4). Segundo Milessi (2017), a celulose e a hemicelulose que são compostos formados

por polímeros de monômeros de açúcares fermentescíveis, que correspondem juntas até 70% da composição total da biomassa.

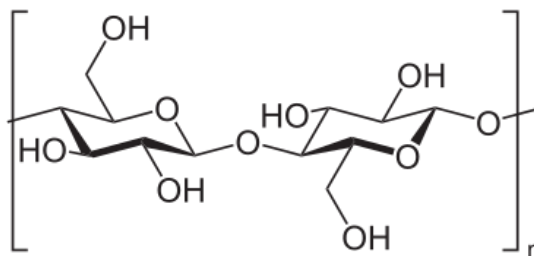
Figura 4 - Estrutura da biomassa lignocelulósica



Fonte: Adaptação de Santos et al. (2012) e Perez (2021).

A celulose é o polímero natural e linear mais abundante no mundo, sendo um dos componentes principais estruturais da parede celular vegetal. É um homopolissacarídeo, ou seja, um polímero de cadeia longa que é constituído de um só monômero, também conhecido como um polímero de glicose (GE et al., 2018), conforme demonstrado na Figura 5. Sua estrutura é formada pela união de moléculas de β -D-glicose por meio de ligações glicosídicas β -(1,4). A sua conformação molecular consiste em regiões cristalinas e amorfas formadas por ligações de hidrogênio intra e intermoleculares. Assim, a estrutura da celulose faz com que as cadeias poliméricas sejam resistentes a despolimerização e altamente insolúveis em água e outros solventes. As cadeias de celulose são integradas formando as fibrilas de celulose (MILESSI, 2017; SANTOS, 2012).

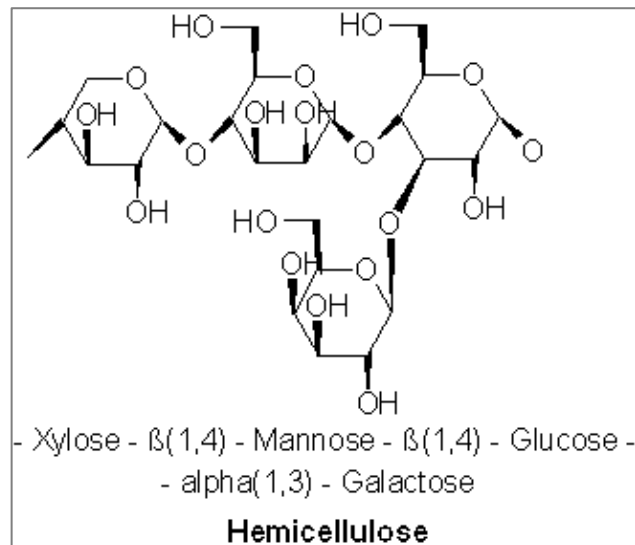
Figura 5 - Estrutura da celulose



Fonte: Adaptado de Alonso et al. (2012).

A hemicelulose é o segundo componente em maior abundância da estrutura da parede celular e encontra-se intercalada com as microfibrilas da celulose, promovendo elasticidade e impedindo-as que se toquem. Sua estrutura de cadeia (Figura 6) é ramificada e amorfa, o que contribui para o aumento de flexibilidade das fibras, sendo solúvel em água e altamente susceptível a hidrólise. A hemicelulose é um heteropolímero, ou seja, é um polímero de baixa massa molecular composto por hexoses, pentoses, ácidos urônicos e grupos acetila. Dos componentes encontrados na hemicelulose, o mais abundante é a xilana (GE et al., 2018; MILESSI, 2017; PEREZ, 2021; SANTOS, 2012). As xilanas são polissacarídeos compostos por xilose (um açúcar, pentose) unidos por pontes glicosídicas β -1,4 na cadeia principal, podendo conter em sua estrutura molecular ramificações de arabinose, manose, galactose, glucose, ácido glucurônico ou 4-O-metil éter e ácidos acético, ferrúlico e p-cumárico (GE et al., 2018; MILESSI, 2017).

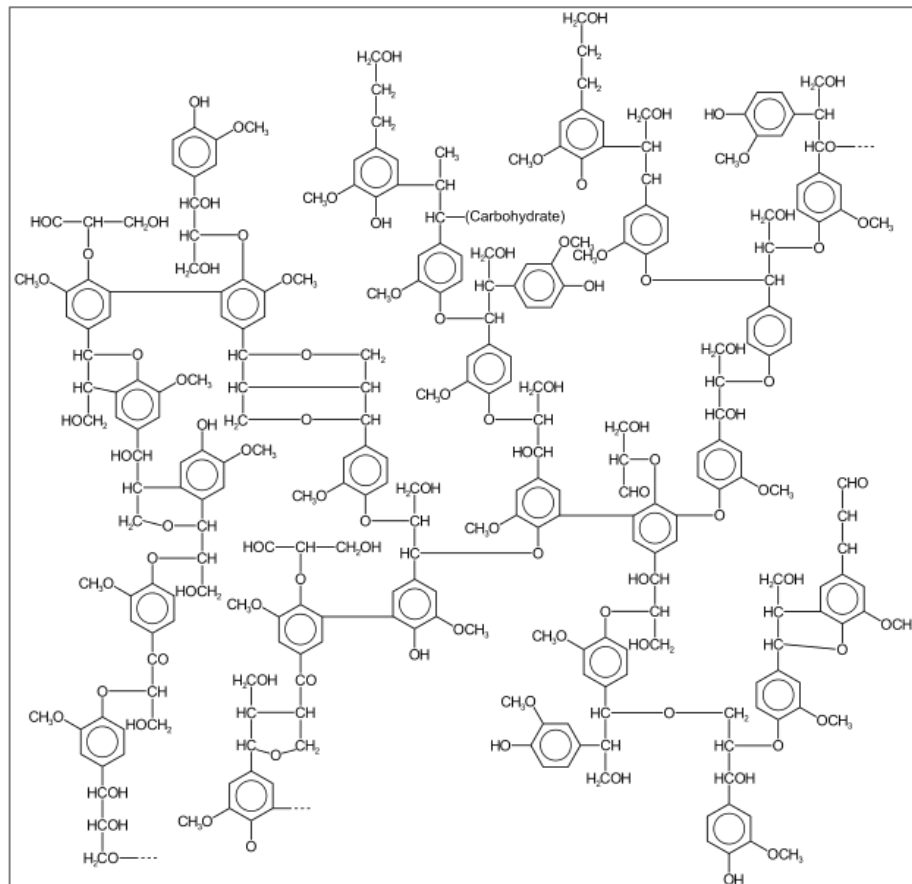
Figura 6 - Estrutura da hemicelulose



Fonte: Adaptado de Alonso et al. (2012).

A lignina é uma macromolécula tridimensional constituída pela polimerização dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico, como demonstrada na Figura 7. Sua estrutura complexa e não homogênea contém regiões amorfas e estruturas globulares. A lignina envolve as microfibrilas celulósicas proporcionando rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e químicos. A composição e proporção da lignina varia de acordo com a espécie e a porcentagem de celulose e hemicelulose nos tecidos vegetais. A lignina e a hemicelulose têm o papel de proteger e envolver, respectivamente, a celulose, conferindo uma associação recalcitrante a biomassa lignocelulósica (CARVALHO, 2018).

Figura 7 - Estrutura da lignina



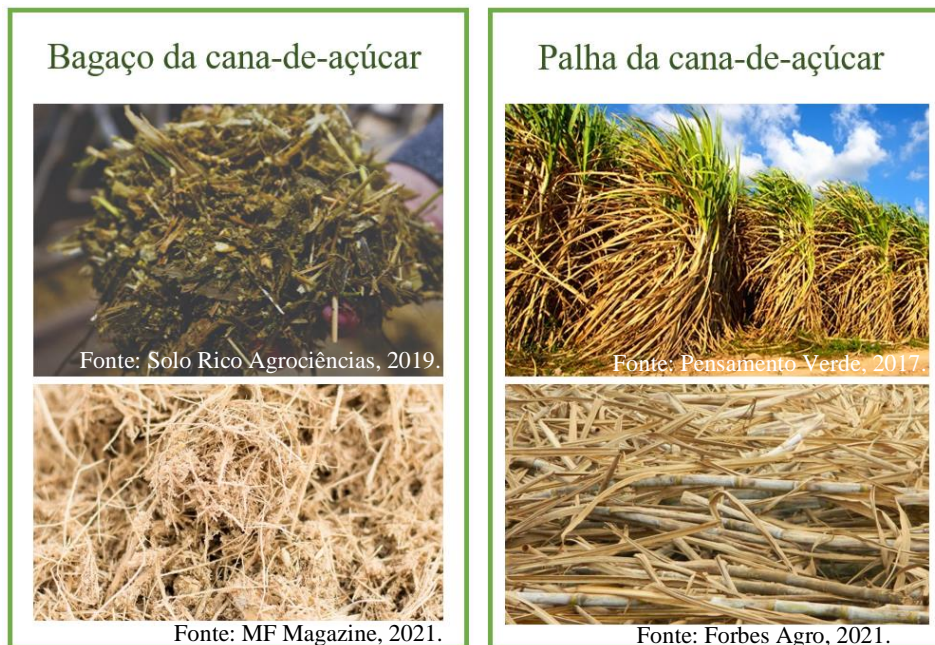
Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2014).

3.3 POTENCIAIS BIOMASSAS – BAGAÇO E PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O Brasil, atualmente, é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, o que traz visibilidade para a utilização da cana como fonte de energia em vários setores industriais. A colheita da safra de cana-de-açúcar de 2020/2021 obteve 654,8 milhões de toneladas destinadas ao setor industrial sucroalcooleiro brasileiro, 1,8% maior que a safra de 2019/2020. A indústria canavieira nas últimas décadas tem elevado sua capacidade de produção e diversificado a utilização dos coprodutos, agregando-lhes valor, como por exemplo o bagaço da cana que serve de matéria-prima para processos industriais, alimentação de animais e na geração de energia. A palha, em sua grande maioria, é deixada no campo como fertilizante e para o controle de pragas. Entretanto, quando recolhida do campo, vem sendo utilizada para a geração de energia (PEREIRA et al., 2015; SANTOS, 2012). O bagaço é a biomassa oriunda da extração do caldo da cana (Figura 8), por meio da moagem da cana-de-açúcar e a palha é o resíduo da colheita

mecanizada da cana-de-açúcar (SANTOS, 2012). Para cada tonelada de cana processada são gerados em torno de 280 kg de material lignocelulósico, sendo divididos em 140 kg de palha (correspondendo a folhas secas verdes e a própria palha da cana) e 140 kg de bagaço seco (PEREIRA et al., 2015).

Figura 8 - Bagaço e palha da cana-de-açúcar



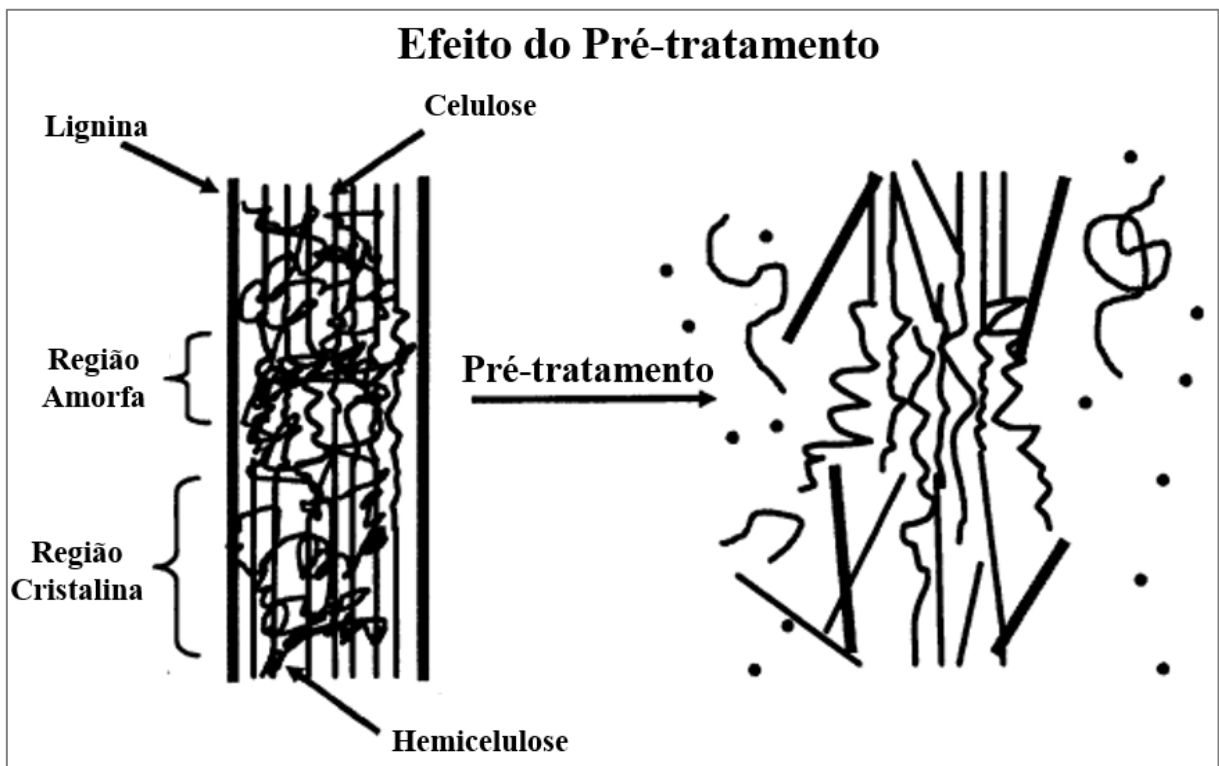
Fonte: Elaboração da autora.

De acordo com Dias et al. (2013), o bagaço e a palha de cana são utilizados como combustíveis na geração de vapor e eletricidade em sistemas de cogeração. Toda eletricidade excedente produzida nas usinas é ofertada ao Sistema Integrado Nacional (SIN), sendo considerada uma alternativa estratégica e economicamente viável na maior parte das vezes de forma a equilibrar a demanda de energia no país (FILHO; PICCIRILLI, 2012). Conforme os dados mais recentes da EPE, a biomassa da cana-de-açúcar é uma parcela muito valiosa na oferta interna de energia, representando 19,1% (EPE, 2021).

Segundo Cerqueira-Leite et al. (2009), em torno de 92% do bagaço gerado no Brasil é destinado à cogeração de energia, porém em frente à elevada quantidade de cana processada ainda estima-se um excedente de bagaço com potencial para gerar em torno de 3,5 bilhões de litros de bioetanol, considerando que celulose e hemicelulose juntas constituem em torno de

70% da biomassa (MILESSI, 2017). Para que os açúcares contidos na celulose e hemicelulose sejam disponibilizados para a produção de etanol 2G, uma etapa de pré-tratamento é necessária para liberá-los. Esta etapa corresponde a uma das etapas operacionais de maiores custos na produção de etanol 2G (PEREZ, 2021), correspondendo em até 30% dos custos fixos diretos da planta. O pré-tratamento consiste em desconstruir o complexo lignina-hemicelulose-celulose, ou seja, o fracionamento da biomassa, para tornar a celulose e hemicelulose mais acessíveis a hidrólise enzimática, para então serem convertidas em açúcares fermentescíveis (ZABED et al., 2016). A Figura 9 demonstra o efeito do pré-tratamento na biomassa lignocelulósica.

Figura 9 - Efeito do pré-tratamento nos materiais lignocelulósicos



Fonte: Adaptado de Mosier et al. (2005).

O pré-tratamento para ser ideal deve consumir pouca energia, ser viável economicamente, ser rápido, com menor degradação dos açúcares, diminuir a cristalinidade e o grau de polimerização da celulose, tornar a biomassa lignocelulósica mais digestível, remover ou alterar a lignina, remover ou alterar a hemicelulose, aumentar a porosidade do material que

será hidrolisado, reduzir os custos de operação e evitar a formação de produtos inibitórios (PEREZ, 2021; SANTOS et al., 2012; ZABED et al., 2016).

Existem diversos tipos de biomassa lignocelulósica, com diferentes características físico-químicas, para isso é necessário escolher a tecnologia adequada para obter os produtos desejados e conhecer os efeitos e o rendimento da biomassa, os impactos nas etapas posteriores ao pré-tratamento, a geração de compostos inibitórios para a etapa de fermentação, a energia necessária no processo e o tratamento dos resíduos oriundos nesta etapa (PEREZ, 2021).

Os métodos de pré-tratamento são classificados em quatro grupos: físico, químico, físico-químico e biológico. Os pré-tratamentos físicos alteram fisicamente a estrutura da biomassa lignocelulósica por meio de métodos de moagem, trituração, radiação, extrusão e altas temperaturas (MERKLEIN; FONG; DENG, 2016), aumentando a porosidade e acessibilidade da área de superfície, reduzindo o tamanho das partículas, reduzindo o grau de polimerização e a cristalinidade da celulose, sendo geralmente usados em conjunto com outro tipo de pré-tratamento (PEREZ, 2021; ZABED et al., 2016; SANTOS et al., 2012).

O pré-tratamento biológico utiliza microrganismos ou enzimas. Este método tem baixa demanda de energia, é efetivo no processo de deslignificação, reduz a polimerização da celulose e hemicelulose, tem baixa formação de inibidores e perdas de carboidratos consumidos pelos microrganismos. Porém apresenta baixas taxas de hidrólise e um período maior de pré-tratamento que as outras tecnologias (MERKLEIN; FONG; DENG, 2016).

Os pré-tratamentos físico-químicos, como o nome mesmo identifica, combinam as técnicas de alteração física e química da biomassa, também conhecido como pré-tratamento combinado, inclui uma variedade de tecnologias, como por exemplo a explosão a vapor, a explosão de fibra de amônia (AFEX), a explosão de CO₂ e o pré-tratamento hidrotérmico. Estes métodos aumentam a área de superfície da biomassa para a acessibilidade de enzimas e removem a hemicelulose e parcialmente a lignina (MERKLEIN; FONG; DENG, 2016; ZABED et al., 2016).

Os pré-tratamentos químicos trabalham com a utilização de químicos para quebrar certas ligações químicas presentes na biomassa, incluindo os métodos organossolve (solventes orgânicos), ozonólise, líquido iônico, tratamentos ácidos (diluído e concentrado) e alcalinos (PEREZ, 2021). Os pré-tratamentos mais comuns e amplamente estudados são os ácidos e

alcalinos (ZABED et al., 2016). O presente trabalho utiliza o pré-tratamento ácido que será descrito com maior detalhamento a seguir.

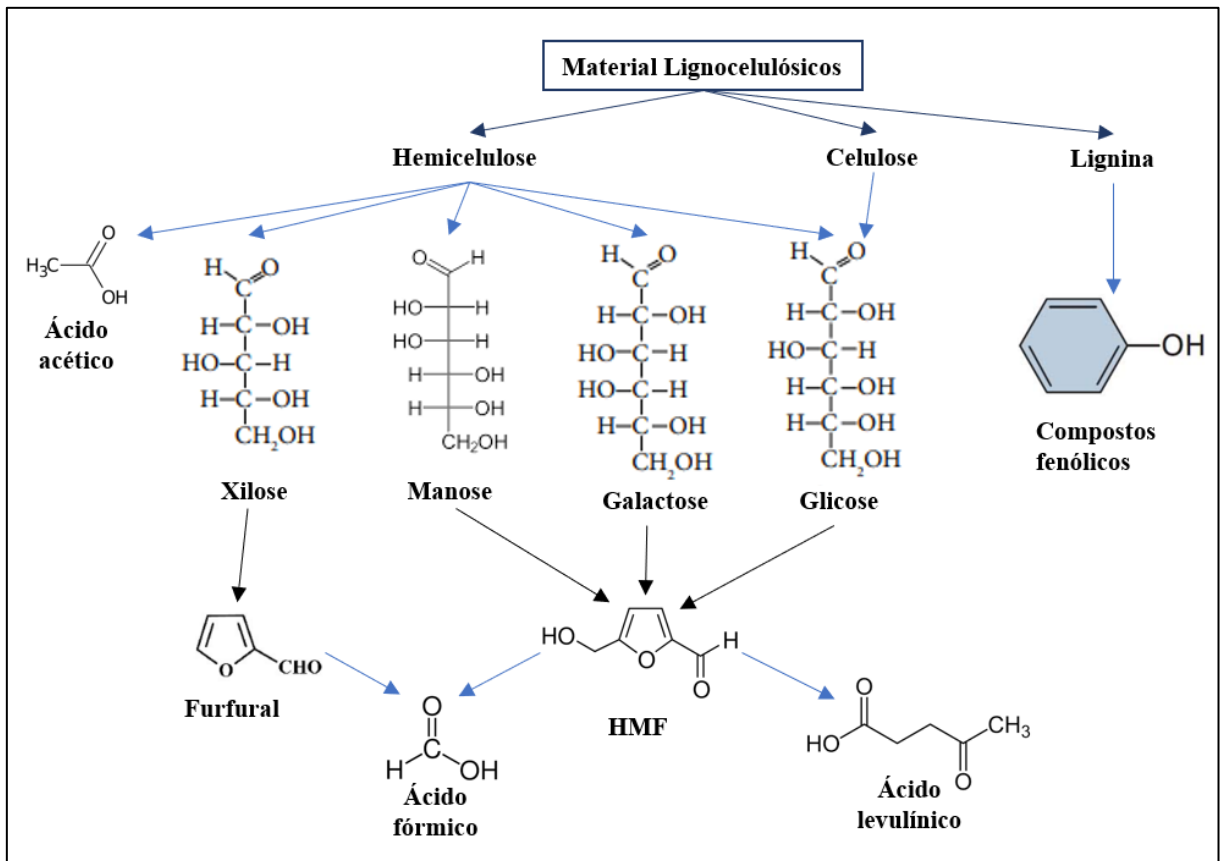
3.3.1 Pré-tratamento ácido

O objetivo principal do tratamento ácido, concentrado ou diluído, é solubilizar a fração hemicelulósica da biomassa lignocelulósica, deixando a celulose mais acessível para a etapa de hidrólise. O pré-tratamento ácido diluído, ocorre com baixas concentrações de ácido e altas temperaturas, enquanto o ácido concentrado, trabalha com altas concentrações e temperaturas mais amenas. Apesar dos dois processos serem utilizados, o uso do ácido diluído é mais vantajoso em relação ao ácido concentrado devido ao fato de produzir menos compostos inibidores, como por exemplo, o hidroximetilfurfural (HMF) e furfural, assim como provocar uma menor corrosão dos equipamentos e reduzir dos problemas de neutralização do ácido. Todos esses fatores são muito importantes na seleção do método pois impactam diretamente nos custos de produção em uma escala comercial (MERKLEIN; FONG; DENG, 2016; PEREZ, 2021).

Segundo Perez (2021), o pré-tratamento com ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído é o método mais estudado e utilizado em resíduos agrícolas. Este pré-tratamento emprega ácido diluído na faixa de concentração de 0,2 a 2,5% (m/m) e temperaturas que variam entre 120 e 210 °C, com tempo de reação na faixa de minutos ou horas. Após o pré-tratamento, obtém-se uma fração sólida contendo celulose e lignina (celulignina) e uma fração líquida correspondente a hemicelulose solubilizada.

Na aplicação do pré-tratamento ácido, uma informação importante que deve ser considerada e analisada é o grau de severidade, o qual combina os dados de temperatura, tempo e concentração de um ácido em um processo. Em condições mais severas, as pentoses da hemicelulose e uma parcela das hexoses, são rapidamente degradadas, produzindo furfurais e ácido acético, inibidores potenciais da fermentação. O furfural é o resultado da desidratação de pentoses, o HMF é o resultado da desidratação de hexoses, e o ácido acético fruto da hidrólise dos grupos acetil da hemicelulose. Os compostos fenólicos e aromáticos advindos da solubilização da lignina e ácidos alifáticos também são componentes encontrados no hidrolisado lignocelulósico (LORENCINI, 2013; PEREZ, 2021). A Figura 10 demonstra as reações que os materiais lignocelulósicos passam durante a formação de inibidores pela degradação da celulose, hemicelulose e lignina.

Figura 10 - Geração de inibidores a partir da hidrólise dos materiais lignocelulósicos



Fonte: Adaptação de Lorencini, 2013.

De acordo com Lorencini (2013) os efeitos inibitórios dos compostos nas leveduras são mais estudados devido ao interesse no uso de hidrolisados de materiais lignocelulósicos como substratos para a produção de etanol. Os inibidores, produzidos em adição aos açúcares fermentescíveis, reduzem consideravelmente o rendimento e a produtividade de etanol, principalmente por afetar o metabolismo dos microrganismos responsáveis pela fermentação. Desta forma, o desenvolvimento de processos que atenuem a formação ou o efeito tóxico destes compostos no processo é de grande importância na área.

3.3.2 Produção de etanol 2G

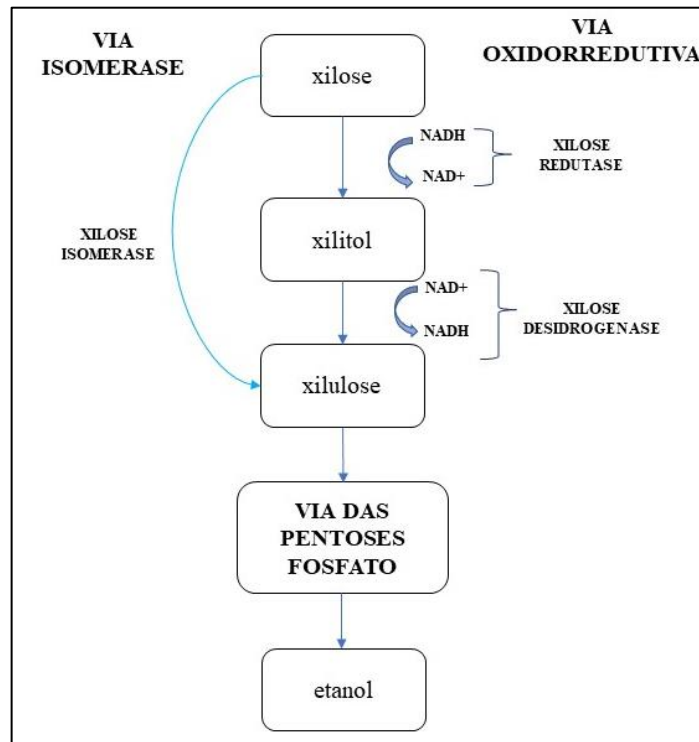
A fermentação é a etapa responsável pela conversão dos açúcares em álcool por ação de microrganismos. A fermentação alcoólica da glicose é um processo bem estabelecido a nível industrial, amplamente utilizado na produção de etanol 1G a partir de caldo de cana e melão

utilizando a levedura *S. cerevisiae*. Esta é uma levedura robusta, tolerante a altas concentrações de etanol e açúcar em ambientes com baixos níveis de oxigênio, capaz de resistir a condições estressantes com alta eficiência de fermentação e consegue ter atividade celular em ambientes ácidos (REIS et al., 2013). Apesar desta levedura ser o principal microrganismo utilizado para produzir etanol em todo o mundo, a mesma conome a xilose proveniente da hemicelulose, de forma que o aproveitamento da fração hemicelulósica da biomassa ainda é um desafio e esta fração atualmente é subutilizada.

Segundo Nakanishi et al. (2017), poucas espécies de leveduras são capazes de fermentar naturalmente a xilose, apenas 1% delas consegue converter a xilose em etanol. Leveduras como *Scheffersomyces stipitis*, *Spathaspora passalidarum*, *Spathaspora arborariae* e *Candida tenuis* embora capazes de produzir etanol a partir da xilose, possuem aplicação em escala industrial limitada devido à baixa tolerância a altas concentrações de etanol, necessidade de ter o fluxo de oxigênio rigidamente regulado (para não retardar a fermentação, nem ter aumento do acúmulo de xilitol e prejudicar a produtividade de etanol) assim como a grande sensibilidade aos inibidores dos hidrolisados (MILESSI, 2017; VERAS; PARACHIN; ALMEIDA, 2017). Neste sentido, a engenharia metabólica vem sendo amplamente utilizada para desenvolver cepas superiores de *S. cerevisiae* capazes de metabolizar xilose.

Para o metabolismo de xilose, as leveduras utilizam a via metabólica baseada em oxirredução. A xilose é reduzida a xilitol pela enzima xilose redutase (XR) e posteriormente o xilitol é oxidado à xilulose pela enzima xilitol desidrogenase (XDH). Alternativamente, a xilose pode ser metabolizada por isomerização, realizada principalmente por bactérias, na qual xilose é isomerizada a xilulose em uma única etapa através da enzima xilose isomerase (XI). Em ambas as vias, a xilulose entra nas vias de pentose fosfato e da glicólise onde será finalmente convertida em etanol (BETTIGA; HAHN-HÄGERDAL; GORWA-GRAUSLUND, 2008; VERAS; PARACHIN; ALMEIDA, 2017). A Figura 11 demonstra as duas vias metabólicas da xilose. Assim, compreender as vias naturais da xilose pode proporcionar uma orientação de como construir cepas eficientes do metabolismo da xilose (ZHAO et al., 2020).

Figura 11 - Vias metabólicas da xilose



Fonte: Elaboração da autora.

Em busca de resultados cada vez melhores, as linhagens de *S. cerevisiae* vem sendo desenvolvidas por meio de biologia molecular e engenharia evolutiva, como forma de viabilizar a produção eficiente de etanol 2G e desenvolver cepas recombinantes mais tolerantes a inibidores e ao etanol (PEREZ, 2021). Os microrganismo recombinantes são o resultado da introdução de genes metabólicos de xilose no DNA de um microrganismo, sendo uma estratégia para fermentar os açúcares da hemicelulose em etanol (ZHAO et al., 2020). Para o etanol 2G, a enzima XI tem sido muito utilizada por não produzir xilitol e não ter o desequilíbrio de oxirredução dos cofatores celulares (LEE et al., 2017). De acordo com Cunha et al. (2019) a via isomerase é ainda um desafio para expressar a xilose isomerase em leveduras, entretanto, expressar a XI de *Clostridium phytofermantan* em uma cepa de laboratório da *S. cerevisiae*, resultou em uma fermentação de xilose, com uma taxa de produção de etanol de 0,43 g(etanol)/h e rendimento de etanol de 0,43 g(etanol)/g(xilose) (BRAT; BOLES; WIEDEMANN, 2009).

Li et al. (2016) analisou o desempenho da fermentação da xilose através das duas vias metabólicas diferentes (via XR/XDH e XI), com a utilização de duas cepas de *S. cerevisiae*

geneticamente modificadas para a produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica. A primeira cepa, denominada SR8, utiliza a via XR/XDH e a segunda cepa, denominada SXA-R2P-E, utiliza a via XI. A cepa SR8 obteve maiores consumos de xilose e taxas de produção de etanol, entretanto a cepa SXA-R2P-E, teve rendimentos de etanol ligeiramente maiores e produziu menos xilitol como subproduto.

Neste sentido, o grupo de pesquisa liderado pelo Prof. Dr. Johan M. Thevelein (NovelYeast/Bélgica) tem se destacado no segmento de desenvolvimento de leveduras recombinantes para a sua utilização em processos industriais. Demeke et al. (2013) modificaram a levedura *Ethanol Red*, uma cepa amplamente utilizada para a produção de etanol 1G, para torná-la capaz de fermentar pentoses com alto rendimento e produtividade em etanol. A cepa desenvolvida, nomeada *S. cerevisiae* GS1.11-26, mostrou um potencial significativo para o desenvolvimento de uma levedura industrial robusta e versátil para a produção eficiente de etanol com vários hidrolisados lignocelulósicos. Meijnen et al. (2016) identificaram o gene HAA1 por meio de uma análise poligênica. Este gene é responsável pela tolerância do ácido acético na levedura. Assim, na construção da levedura *S. cerevisiae* GSE16-T18-HAA1, foram inseridas duas cópias do gene HAA1 na GSE16-T18, conferindo maior tolerância ao ácido acético na cepa industrial da produção de etanol 2G. Vanmarcke et al. (2021) transferiram fatores genéticos da levedura *Candida glabrata*, responsáveis pela alta tolerância aos inibidores presentes nos hidrolisados lignocelulósicos e em outros meios industriais, para a levedura *S. cerevisiae*, melhorando a tolerância da *S. cerevisiae* contra os inibidores dos meios.

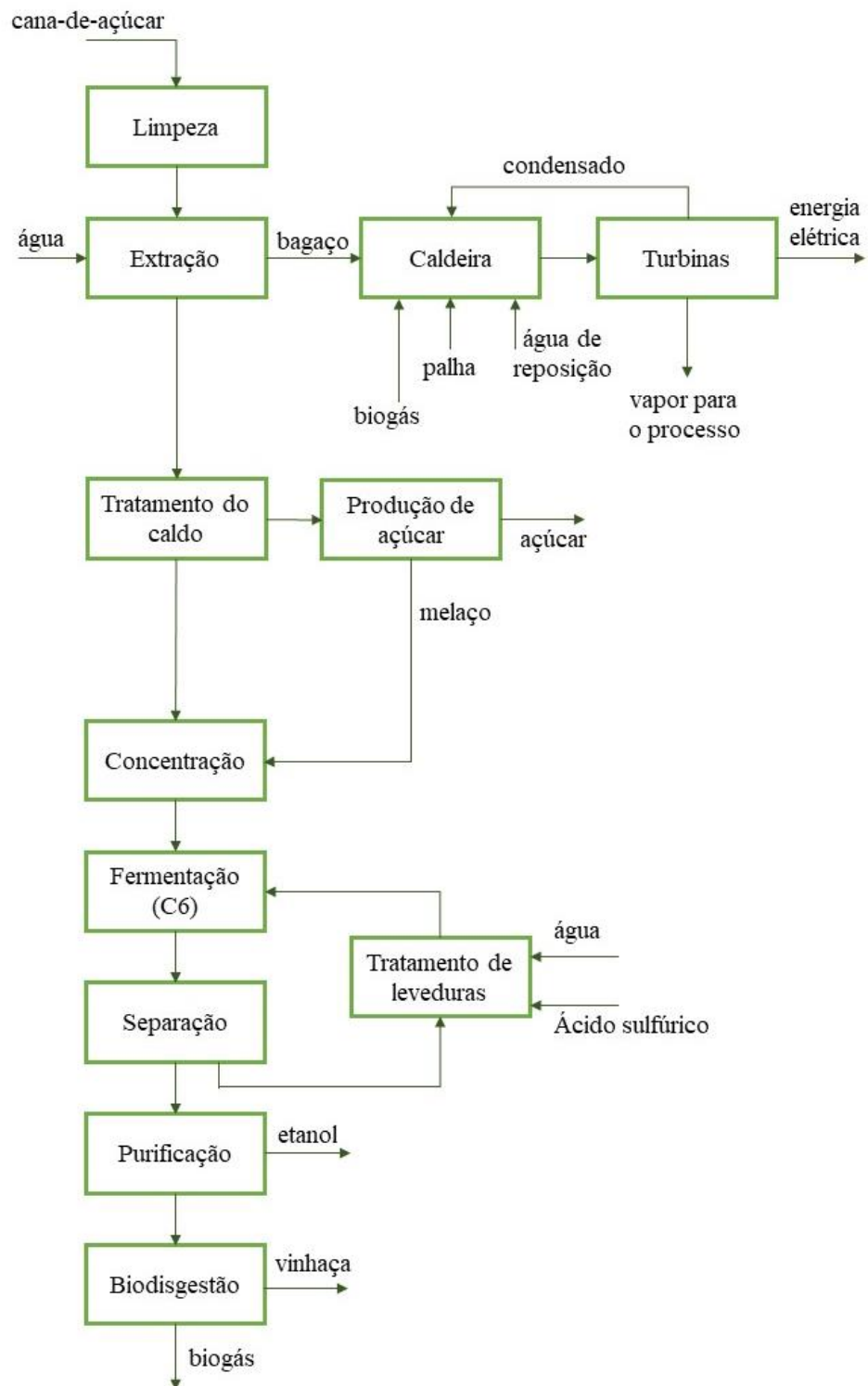
As leveduras em desenvolvimento são adequadas para obter elevada tolerância aos compostos inibitórios presentes nos meios fermentativos, apresentando alta produtividade e rendimento em etanol, sendo capazes de assimilar de forma eficiente os açúcares fermentescíveis, como por exemplo a xilose, com formação mínima de subprodutos, como glicerol, xilitol e ácido acético (PEREZ, 2021). Em Perez (2021) três leveduras recombinantes, desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Johan Thevelein e denominadas T18, HAA1 e MDS130, foram estudadas analisando os rendimentos e produtividades em etanol em bateladas. A levedura MDS130, em especial, se destacou apresentando produtividades da ordem de 20 g/L/h, sendo comparável à produtividade de etanol 1G, sendo assim a cepa selecionada pelos autores e avaliada no processo estudado no presente trabalho.

3.4 INTEGRAÇÃO 1G2G

A integração da produção de etanol 2G com a produção 1G permite o aproveitamento da infraestrutura da planta 1G, gera uma melhor utilização da matéria-prima na indústria, reduz o uso de recursos ambientais e a geração de resíduos, diminuindo os custos de capital, de investimento e de produção quando comparados com a planta 1G e 2G operando de forma separadas (DIAS et al., 2012; LONGATI, 2018; MACRELLI; GALBE; WALLBERG, 2014). Embora os processos industriais de produção de etanol 1G e 2G tenham algumas diferenças tecnológicas, tanto em matérias-primas e alguns equipamentos, algumas operações como a destilação e a cogeração podem ser compartilhadas na mesma planta, o que torna a integração das duas tecnologias um processo vantajoso (CARPIO, 2019). Além disso, o processo 1G e 2G podem trabalhar de forma simultânea e paralela, contendo a possibilidade de unificação de outros setores importantes como o setor administrativo, marketing, distribuição e logística, o que pode resultar em uma vantagem econômica.

A produção 1G de etanol é caracterizada pelas seguintes etapas: limpeza e preparação da cana, extração do caldo, tratamento do caldo, concentração do caldo, fermentação, destilação, desidratação e cogeração, como descrito por Dias et al. (2014). A Figura 12 representa o processo de produção de etanol 1G.

Figura 12 - Produção de açúcar e etanol 1G



Fonte: Elaboração da autora.

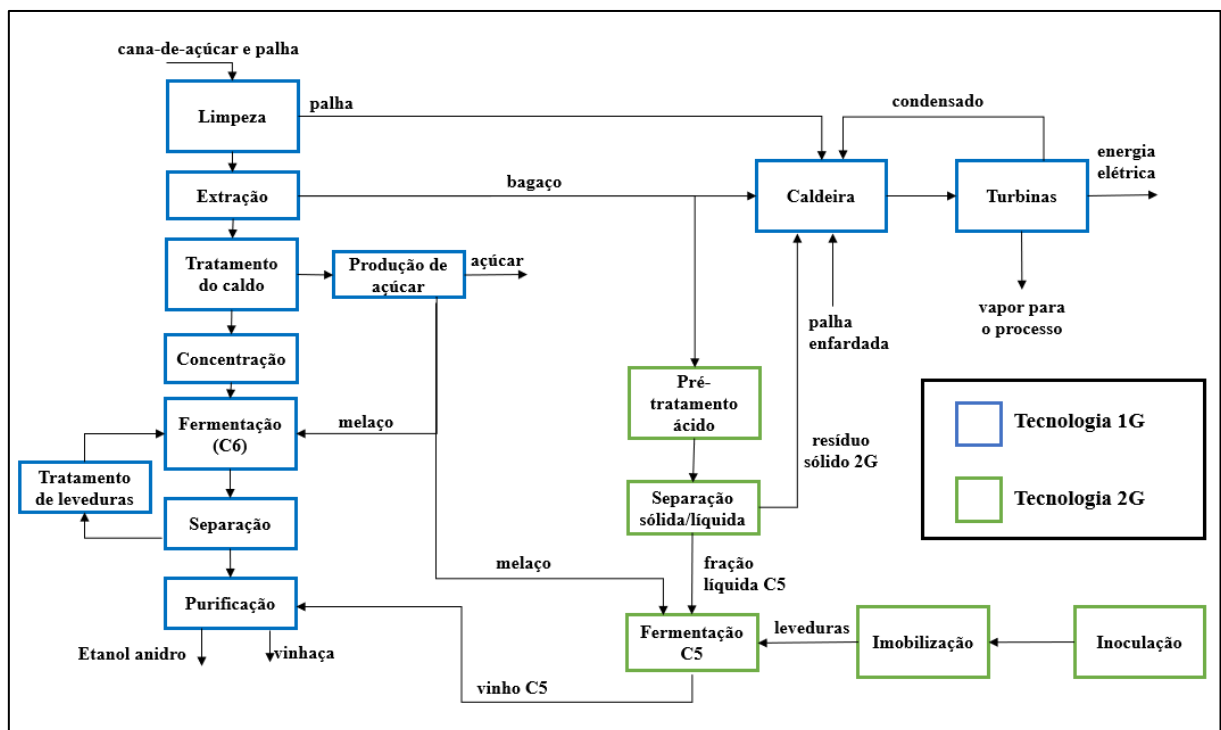
O melaço, componente utilizado na produção de etanol 1G, é um subproduto obtido no processo de produção de açúcar. O caldo após o processo de evaporação é destinado a cristalizadores, que diminuem a concentração da água transformando o caldo em uma massa, para aumentar o grau de cristalização. Essa massa passa por um processo de centrifugação, onde os cristais são separados do mel. O melaço é o mel final da produção de açúcar, caracterizado pelos altos teores de açúcares fermentativos que não foram cristalizados, como a glicose, sacarose e frutose (FILHO; PICCIRILLI, 2012). Para a produção de etanol, o melaço é considerado uma fonte de carbono importante para o metabolismo dos microrganismos (BEHERA; MOHANTY; RAY, 2012), sendo utilizado para corrigir eventuais deficiências no nutricionais no caldo da cana-de-açúcar, tornando-lhes um substrato melhor (BASSO; BASSO; ROCHA, 2011). Além disso, o melaço ainda contém nutrientes como fosfato, nitrogênio, vitaminas, potássio e mineirais (PEREZ, 2021).

A indústria de etanol 1G tradicionalmente utiliza o melaço para produzir etanol, entretanto, devido às elevadas concentrações de açúcares no melaço (da ordem de 877,9g/L), uma etapa de diluição do mesmo é realizada para que a levedura seja capaz de fermentar este substrato. Uma alternativa inserida no contexto de integração 1G2G é realizar esta diluição pela adição de hidrolisado lignocelulósico de biomassa ao melaço, realizando a fermentação destes açúcares em uma única etapa e reator. De acordo com Perez et al. (2022), a utilização do melaço tem um papel importante na integração 1G2G, pois propicia a obtenção de um meio fermentativo industrial, que não necessita de suplementação com peptona e extrato de levedura, ambos compostos que agregam custos consideráveis ao processo. Além disso, os inibidores presentes no hidrolisado possivelmente também são diluídos a concentrações abaixo das consideradas tóxicas aos microrganismos. É importante ressaltar que além do trabalho de Perez et al. (2022) realizado no grupo, não foram encontrados relatos na literatura utilizando a mistura de melaço e hidrolisado hemicelulósico para a produção de etanol a partir de xilose.

Perez et al. (2022) desenvolveu um processo integrado de produção de etanol 1G2G em reator de leito fixo a partir de hidrolisado ácido bruto de hemicelulose suplementado com melaço, utilizando a cepa recombinante pré-selecionada *S. cerevisiae* MDS130 imobilizada em esferas de alginato de cálcio. Dentre as vantagens relacionadas à mistura do melaço ao hidrolisado, está a eliminação das etapas de concentração e destoxificação do hidrolisado, já que a adição do melaço garante elevados teores de açúcares e reduz a concentração dos inibidores. Vale ainda destacar as vantagens de se operar processos utilizando células

imobilizadas, como a facilidade de recuperação do biocatalisador, a possibilidade de se operar de modo contínuo ou em bateladas repetidas e a obtenção de elevadas produtividades volumétricas. A autora conduziu o processo em reator de leito fixo operando em bateladas repetidas e obteve elevadas produtividades (entre 14,07 e 22,81 g/L/h) e rendimentos em etanol (entre 0,35 e 0,51 g_{etanol}/g_{ART}), alcançando elevadas concentrações de etanol (46,98 g/L). Além dos parâmetros de processo promissores, a autora ainda comprovou que a utilização da mistura de melão com hidrolisado hemicelulósico bruto atenua o efeito inibitório dos compostos tóxicos, realizando ciclos fermentativos com duração de apenas 2h e sem a necessidade da realização de uma etapa de concentração para se obter elevadas concentrações de açúcares e sem realizar a destoxificação do hidrolisado para remoção dos inibidores, o que acarretaria em custos do processo. O processo desenvolvido por Perez et al. (2022) assim como sua integração com a tecnologia 1G pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Processo integrado 1G2G



Fonte: Elaboração da autora.

Para que este processo seja, de fato, implementado em escala industrial, é necessária uma análise técnico-econômica e ambiental para fornecer uma compreensão a respeito da viabilidade econômica e impactos ambientais de implantação deste processo. Por meio da modelagem e simulação do processo, estas avaliações identificam gargalos, etapas e variáveis-chaves do processo para que ele se torne economicamente viável e para que seja possível reduzir seu impacto ambiental, se for o caso. Essa análise é necessária pois possibilita de forma abrangente, o estudo prévio do processo, fornecendo uma visão sobre as áreas onde necessitam um maior foco em pesquisa e desenvolvimento (P&D) para alcançar uma melhoria, podendo ser através da substituição de uma matéria-prima ou na melhoria de um procedimento em uma determinada etapa do processo. Dessa forma, a inclusão da avaliação técnico-econômica e ambiental de processos que estão em desenvolvimento é fundamental para auxiliar nas decisões relacionadas aos investimentos industriais de melhorias, da viabilidade de novas tecnologias e de novos processos (LONGATI, et al., 2018). Considerando que o aproveitamento da hemicelulose da biomassa em escala industrial ainda é um desafio a nível global, este tipo de análise do processo proposto por Perez et al. (2022) se faz necessária, podendo contribuir para o estabelecimento de um novo processo para o aproveitamento desta fração da biomassa.

3.5 AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA (ATE)

A ATE é um método que analisa o desempenho econômico de um processo industrial, produto ou serviço. Ela conecta processos de P&D, engenharia e negócios, que incluem o modelo do processo, modelo de custo capital, modelo do custo operacional e as análises do fluxo de caixa (CHRIS BURK, 2018). Esta análise promove a avaliação da viabilidade da implantação de um projeto, onde os dados encontram-se na literatura, por meio de conhecimentos técnicos praticados anteriormente no setor industrial (STEPHENS et al., 2010). Dessa forma, a ATE tem como objetivo auxiliar a tomada de decisão sobre a direção de pesquisas, desenvolvimentos, demonstração, implantação e investimentos, onde fornece os valores de forma geral, tanto do custo como do benefício e lucratividade de uma tecnologia, identificando/antecipando todos os parâmetros que levam as empresas a situações de difícil resolução e os possíveis gargalos, gera análises de sensibilidade, determina as escalas de produção, identifica os rendimentos desejados, quantifica as incertezas e riscos, os custos de fabricação, as oportunidades de mercado e gera melhorias nos modelos abordados conforme novas informações se tornem disponíveis e acessíveis (ZIMMERMANN et al., 2020).

Pratto et al., (2020) propuseram a aplicação da ATE para avaliar a viabilidade do processo de pré-sacarificação e sacarificação e fermentação simultâneas (PSSSF) dentro de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar de 1G2G para produzir etanol 2G a partir da celulose da palha da cana. Os autores realizaram a estimativa das despesas de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) e basearam a ATE nos cálculos do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Preço Mínimo de Venda do Etanol (PMVE). Os autores encontraram que o etanol 2G na configuração analisada não é viável, apresentando um VPL negativo (-15,57 milhões de USD) e uma TIR de 7,7% inferior à Taxa de Retorno Mínima Aceitável assumida como 11%/ano. No entanto, a análise de sensibilidade indicou que um aumento de 20,5% no preço do etanol ou então uma diminuição de 23,3% no OPEX garantiria a viabilidade do processo. Com isso, os resultados mostraram o potencial existente para o etanol 2G atingir sua viabilidade industrial, sendo necessário melhorias na eficiência dos coquetéis enzimáticos e na tecnologia envolvida neste processo, reduzindo os custos do OPEX.

Junqueira et al. (2017) realizaram um estudo de caso quantificando os impactos econômicos das biorrefinarias de cana-de-açúcar, considerando as projeções tecnológicas e econômicas entre os anos de 2015 e 2030. Os cenários consideram melhorias nos sistemas de produção de cana-de-açúcar e energia, na conversão industrial dos processos 1G e 2G e perspectivas de mercado (custo de enzimas e o investimentos em equipamentos) de acordo com três horizontes temporais: curto, médio e longo prazo. O custo de produção foi utilizado como principal resultado econômico, sendo composto por custos operacionais e custos de capital. Os resultados encontrados mostram que o etanol 2G permite aumentar a produção de etanol nos três horizontes de tempo, devido ao aumento do rendimento, a introdução da cana-energia como matéria-prima e a redução na demanda de vapor. Entretanto quando comparada a tecnologia 1G, o seu custo de produção é mais elevado em razão dos processos de pré-tratamento, fermentação C5 e hidrólise enzimática. Entretanto, em longo prazo, a tecnologia 2G se torna mais competitiva apresentando uma redução de custos, tanto de capital como dos custos de enzimas e da biomassa, quando comparada a tecnologia 1G.

Longati et al. (2019) realizam um estudo avaliando a viabilidade técnico-econômica da inclusão da biodigestão da vinhaça para a produção de biogás em diferentes configurações de biorrefinarias de cana-de-açúcar. Os três cenários analisados são: uma usina de etanol 1G, uma usina de etanol com integração 1G2G com fermentação alcoólica da fração hemicelulósica (C5) e uma usina de etanol 1G2G com biodigestão da fração C5. Os autores realizaram a estimativa

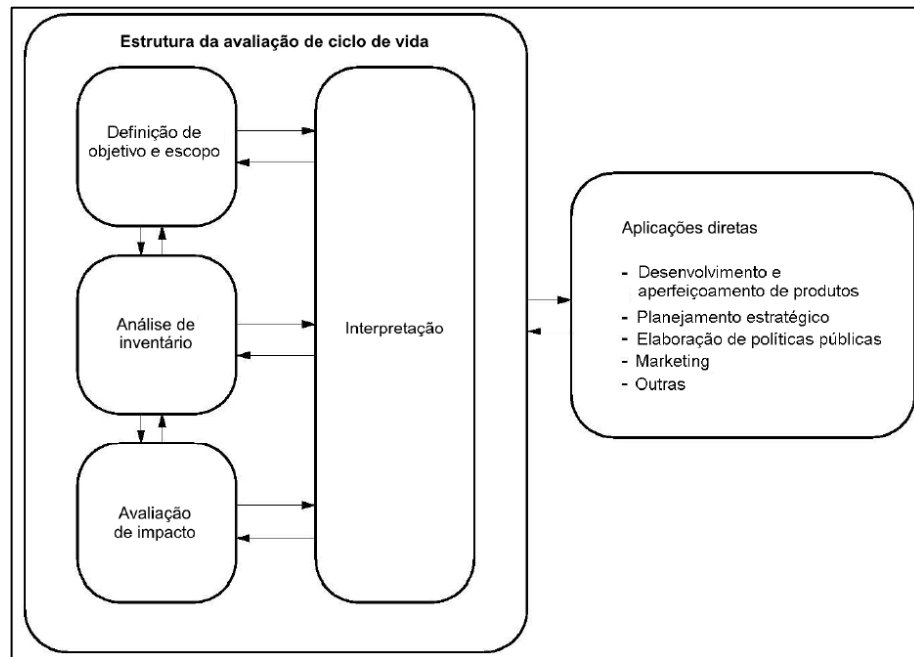
de CAPEX, OPEX e estimaram o VPL e a TIR da unidade de biodigestão anaeróbica. O resultado desta análise mostrou que a utilização do biogás da vinhaça para uma usina 1G obteve um VLP positivo e uma produção de eletricidade maior em 9,2%. Desta forma, fica evidente a importância deste tipo de análise previamente à implementação de um processo.

3.6 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

A avaliação ambiental é definida como o processo que identifica, estima e avalia os impactos ambientais de projetos existentes e/ou propostos com a aplicação de diferentes metodologias. O objetivo desta avaliação é gerar um diagnóstico ambiental, descrevendo os níveis de contaminação, distúrbio ou preservação de um determinado ambiente. Esta avaliação é importante para mitigar os efeitos negativos de projetos e nas tomadas de decisões (SANTIAGO, 2016).

A ACV é uma das técnicas de avaliação ambiental mais utilizadas, podendo ser empregada em avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental. A metodologia baseia-se em dados de produtos, bens de serviço ou procedimento de um estudo (ABNT, 2014). Além disso, a ACV é comumente utilizada para a comparação entre um ou mais produtos, como quesito de desempate para produtos com menores impactos ambientais (MARCAL et al., 2013). Sua estrutura é baseada nas normas ISO 14040 e 14044 (Figura 14), composta por quatro diferentes fases: 1) definição do escopo, 2) fase de análise de inventário, 3) avaliação de impactos, 4) a fase de interpretação (ABNT, 2014).

Figura 14 - Estrutura da avaliação do ciclo de vida



Fonte: ABNT, 2014.

A definição do objetivo e do escopo é a etapa que identifica as informações do estudo, os processos a serem analisados. Nesta etapa deverão ser definidos os seguintes itens: a função do sistema estudado, a unidade funcional e as fronteiras do sistema (ESTEVEZ, 2016). A função do sistema é a finalidade do uso do produto. A unidade funcional tem como principal função fornecer uma referência para que as entradas e saídas do sistema sejam relacionadas, ou seja, uma unidade de referência (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2019). As fronteiras do sistema auxiliam a determinar e definir quais etapas dos processos do sistema serão incluídas no estudo e as que serão excluídas. A análise do inventário do ciclo de vida é a etapa que envolve a coleta de dados e as ferramentas de realização de cálculo para quantificar as entradas e as saídas pertinentes do sistema (ABNT, 2014). O primeiro passo para a construção do inventário é a preparação de um fluxograma do sistema. A interpretação e quantificação dos dados do sistema, uso de recursos naturais, emissões geradas e emitidas no ar, na água e no solo, lista de materiais utilizados, energia consumida, são itens que serão analisados dentro das fronteiras do sistema do fluxograma. A avaliação de impacto é dirigida a etapa que avalia os potenciais impactos ambientais e seus significados no meio ambiente. O nível de detalhe, a escolha dos impactos avaliados, os métodos e os resultados obtidos dependerão do objetivo e

escopo e da análise dos dados do inventário (FURTADO, 2014). A interpretação é a última etapa da ACV, corresponde aos resultados obtidos da análise de inventário e da avaliação de impacto que são combinados com o objetivo e escopo para que possibilite tirar conclusões e fazer recomendações (ESTEVES, 2016).

Em suma, este tipo análise é um dos principais instrumentos utilizados na avaliação de impactos ambientais decorrentes de um determinado projeto ou produção. Disponibilizando informações importantes para as tomadas de decisão em empresas em conjunto com as análises técnico-econômicas.

Junqueira et al. (2017) realizaram um estudo de caso onde quantificaram os impactos ambientais das biorrefinarias de cana-de-açúcar, abordando as tecnologias atuais e futuras da produção de etanol 1G e 2G em três horizontes de tempo: curto, médio e longo prazo. Foram consideradas melhorias do processo industrial, dos sistemas de produção de biomassa e conversão industrial. A ACV foi utilizada para avaliar os possíveis impactos ambientais, por meio do *software* SimaPro, utilizando o banco de dados Ecoinvent v2.2, com o método de avaliação de impacto ReCiPe Midpoint H v 1.08. Os autores encontraram que as emissões que causam as mudanças climáticas do processo 2G foram menores que os processos 1G para todos os horizontes de tempo. Os maiores impactos ambientais (cerca de 24 gCO₂ eq / MJ) estão relacionados ao cenário base 1G, que comercializa apenas etanol no horizonte de tempo de curto prazo. Devido a rendimentos de etanol mais elevados (ou seja, mais etanol é produzido a partir da mesma quantidade de biomassa) e aos avanços esperados na tecnologia 2G em longo prazo, foi observada uma mitigação substancial das emissões que impactam nas mudanças climáticas, resultando em valores tão baixos quanto 7,5 gCO₂ eq / MJ.

Maga et al. (2019) apresentaram uma ACV comparando e avaliando os potenciais impactos ambientais da produção de etanol 1G de cana-de-açúcar no cenário brasileiro com a produção autônoma de etanol 2G (através de bagaço e palha da cana-de-açúcar) e a produção de etanol por meio de uma tecnologia que integra o processo 1G e 2G. Os dados do balanço de massa e energia foram compilados de doze estudos importantes encontrados na literatura da produção de bioetanol, abordando temáticas como: a produção de etanol 1G, a produção de etanol 2G, processos comparativos entre a produção 1G e 2G e a produção integrada de etanol 1G e 2G. Os resultados encontrados demonstram que as emissões de GEE pelo etanol 2G são as menores quando comparadas com a produção 1G e 1G2G de etanol, obtendo cerca 0,19 gCO₂ eq / L etanol. Comparando a tecnologia 1G e 2G, a tecnologia 2G obteve um desempenho

melhor que a 1G em quase todas as categorias de impacto, com exceção da categoria de esgotamento de recursos, que é fortemente influenciada pela preparação do inóculo que necessita de grandes quantidades de fosfato de amônio. Analisando a tecnologia 1G e a 1G2G, constatou-se que a tecnologia 1G2G obteve reduções dos impactos em quase todas as categorias. Entretanto, devido a menor disponibilidade de bagaço para a produção de vapor, a energia térmica necessária para converter o material lignocelulósico em etanol foi complementada com a queima de gás natural, o que contribuiu para um maior impacto de aquecimento global e insuficiência energética da planta. Enquanto a produção do inóculo influencia fortemente a categoria de esgotamento de recursos e a cogeração de energia a formação fotoquímica de ozônio.

Apesar de vários estudos na literatura abordarem a utilização da xilose para a produção de etanol em uma estrutura de biorrefinaria 1G2G, os dados de Perez et al. (2022) são os primeiros dados experimentais encontrados na literatura utilizando a xilose em um processo de cofermentação com o melaço que podem ser utilizados em um processo tecnicamente viável ou em escala industrial, atingindo elevados rendimentos e produtividades em bateladas de apenas 2h.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 *SOFTWARES* UTILIZADOS

4.1.1 Simulador EMSO

O simulador EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*) foi o *software* escolhido como plataforma de simulações do processo industrial deste trabalho. O EMSO é orientado por equações para realizar modelagem, simulação e otimização de processos dinâmicos ou estacionários (SOARES, 2007). Este simulador é uma ferramenta importante para diversos usos, como o controle e operação de uma planta, a validação de projetos, o aumento de produção e a redução de custos. O EMSO conta com a checagem automática da consistência das unidades de medida, graus de liberdade e consistência das condições iniciais (SOARES; SECCHI, 2003). Esta ferramenta possibilita ao usuário desenvolver novos modelos por meio da linguagem de modelagem ou utilizar os modelos existentes em sua biblioteca em sua simulação e modelagem de processos. Além disso, o EMSO contém uma interface para inserir novas bibliotecas e *plug-ins* que facilitam a implementação de novas funcionalidades em sua estrutura (FURLAN, 2016). O EMSO apresenta a possibilidade de utilizar rotinas externas desenvolvidas em linguagem C, C++ e Fortran, onde os códigos existentes nestas linguagens são utilizados na solução de um determinado problema (LONGATI, 2018). Além disso, esta ferramenta proporciona a visualização dos resultados obtidos em cada simulação (LONGATI, 2018).

4.1.2 SimaPro®

O *software* SimaPro® foi selecionado para realizar a ACV. O SimaPro é o *software* líder mundial deste segmento, desenvolvido pela *PRé Sustainability* que segue as recomendações da série ISO 14040 para a realização de uma ACV. Esta ferramenta permite que o usuário realize a modelagem e ACVs complexos com inúmeros dados de forma eficiente, confiável, transparente e sistemática. O *software* conta com uma cobertura vasta de metodologias de avaliação de impactos ambientais que avaliam diferentes categorias de impacto para que seja possível fazer a interpretação e discussão dos resultados. Para isso, tanto a etapa de inventário e a seleção do método de avaliação de impacto devem estar alinhados com o escopo e objetivos da ACV para conseguir obter o nível desejado de integração dos resultados (GOEDKOOOP et al., 2016).

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os modelos matemáticos utilizados neste trabalho foram baseados em parâmetros e dados técnicos (descritos nos itens 4.3.3.1, 4.3.3.2 e 4.3.3.3) que auxiliaram na construção dos Cenários I, II e III. Além disso, a modelagem dos cenários foi baseada em balanços de massa e energia, reações estequiométricas, dados termodinâmicos, relações constitutivas através do equacionamento no *software* EMSO (descrito no item 4.1.1) para descrever a operação do processo de produção de etanol, e fornecer informações úteis para as análises técnica, econômica e ambiental.

4.2.1 Lista de componentes

A lista de componentes que foram utilizados na modelagem da biorrefinaria virtual utilizada neste trabalho, assim como no processo integrado de Perez (2021) está detalhada na Tabela 2, onde todos os elementos estão numerados e divididos em duas colunas de acordo com sua fase (fluida ou sólida). Esta estrutura é baseada nos trabalhos desenvolvidos pela equipe da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) na temática de biorrefinaria.

Tabela 2 - Lista de componentes da biorrefinaria

FASE FLUIDA		FASE FLUIDA (Continuação)		FASE SÓLIDA	
Numeração	Componente	Numeração	Componente	Numeração	Componente
1	Água	14	Xilana	26	Celulose
2	Sacarose	15	Ácido acético	27	Xilana
3	Glicose	16	Furfural	28	Lignina
4	Xilose	17	Hidroximetilfurfural (HMF)	29	Cinzas
5	Etanol	18	Glicerol	30	Enzima
6	CO ₂	19	Solunkn (Açúcares desconhecidos)	31	Levedura
7	CO	20	Monoetilenoglicol (MEG)	32	Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)
8	O ₂	21	H ₂ SO ₄	33	Fosfato de Cálcio (Ca ₃ (PO ₄) ₂)
9	N ₂	22	Ácido Fosfórico	34	Impurezas
10	H ₂	23	Impurezas		
11	CH ₄	24	Celobiose		
12	Amônia	25	Hidróxido de Amônia		
13	Lignina				

Fonte: UFSCar, 2016.

4.2.2 Composição da Matéria-Prima

A Tabela 3 destaca a composição de todas as matérias-primas utilizadas durante as simulações da biorrefinaria.

Tabela 3 - Composição das matérias-primas utilizadas na biorrefinaria

	Componente	Composição (%) em base úmida	Referência
Cana-de-açúcar	Água	69,864	Longati et al. (2019)
	Sacarose	14,033	
	Glicose	1,303	
	Fibras	13,653	
	Terras e cinzas	1,147	
Bagaço da cana-de-açúcar	Celulose	43,38	Longati et al. (2019)
	Hemicelulose	25,63	
	Lignina	23,24	
	Cinzas	2,94	
	Impurezas	4,81	
Melaço	Glicose	9,06	Perez et al. (2022)
	Sacarose	81,92	
	Frutose	9,02	
Hidrolisado hemicelulósico	Xilose	74,57	Perez et al. (2022)
	Glicose	5,33	
	Ácido acético	18,85	
	Furfural	1,23	
	Hidroximetilfurfural (HMF)	0,02	
Palha da cana-de-açúcar	Celulose	46,05	Longati et al. (2019)
	Hemicelulose	27,2	
	Lignina	24,67	
	Cinzas	2,08	

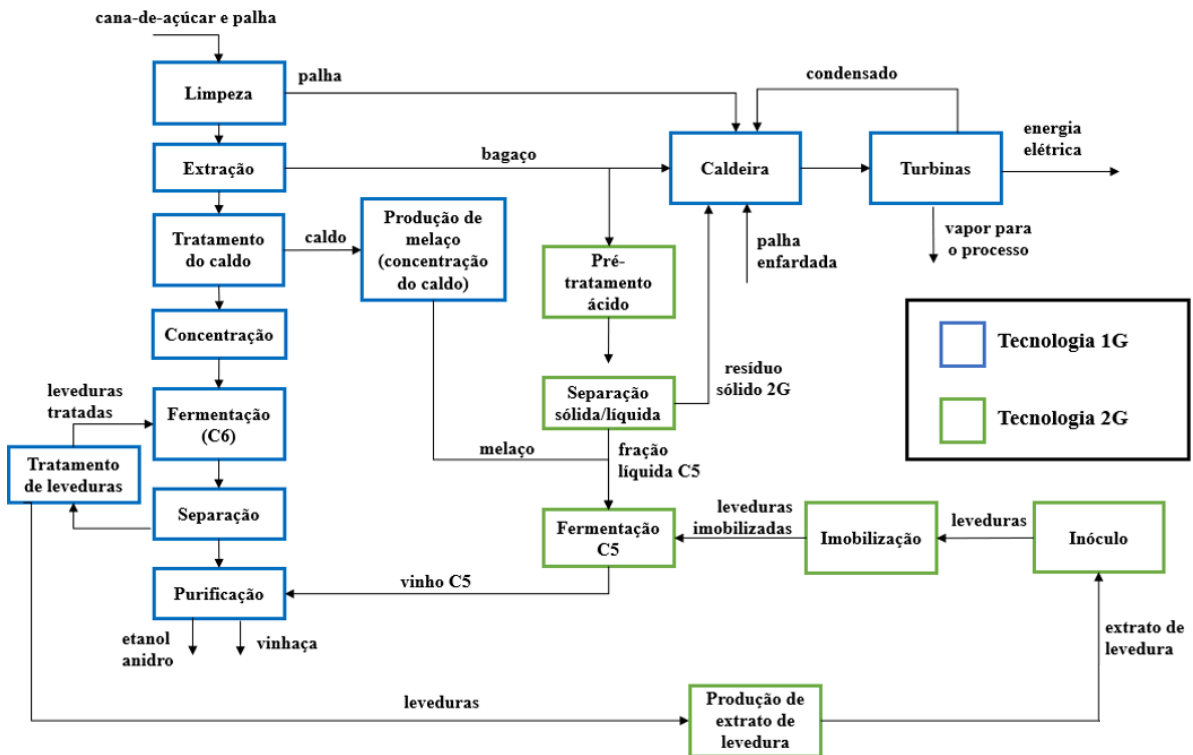
Fonte: Elaboração da autora.

4.2.3 Descrição da produção de etanol na biorrefinaria

O processo de produção de etanol integrado foi simulado para uma unidade industrial considerando os dados de Longati et al. (2018) para o processo 1G e os dados obtidos por Perez

et al. (2022) para o processo 2G. A Figura 15 demonstra o diagrama de fluxo de blocos da biorrefinaria implementada, destacando os processos 1G e 2G.

Figura 15 - Fluxograma da biorrefinaria integrada 1G2G proposta no presente trabalho



Fonte: Elaboração da autora.

A cana-de-açúcar, ao entrar na unidade industrial, é encaminhada para o processo de limpeza a seco, onde será separada das impurezas vegetais (como a palha) e resíduos minerais (como a terra) que vieram junto da colheita. A palha da cana é recolhida do campo, passa por um processo de arreamento seguido do enfardamento, sendo transportada para usina em fardos retangulares. Após a limpeza, a palha enfardada é misturada as impurezas vegetais, sendo direcionada a caldeira, enquanto a cana é enviada para a etapa de extração, onde os açúcares fermentescíveis são separados do bagaço. Os açúcares fermentescíveis do caldo seguem para as etapas de tratamento do caldo, concentração, fermentação, separação e purificação para a obtenção de etanol. Mais detalhes da etapa 1G do processo podem ser encontrados em Longati et al. (2019).

O bagaço obtido a partir da extração do caldo é dividido em duas correntes. Uma parcela deste bagaço é enviada para a etapa de cogeração e a outra é encaminhada para a produção de etanol 2G. A fração destinada a cogeração serve de combustível para a geração de eletricidade e vapor, de forma a suprir toda a energia demandada na usina. Além do bagaço, outros combustíveis são utilizados na etapa de cogeração, como a palha e a fração sólida oriunda do processo do pré-tratamento (composta de lignina e celulose não hidrolisada). A fração do bagaço destinada a produção de etanol 2G passa pela etapa de pré-tratamento, que é responsável pelo rompimento da estrutura lignocelulósica da biomassa, resultando em duas frações a serem separadas, a líquida e a sólida. A fração líquida corresponde a hemicelulose solubilizada (rica em xilose) e alguns subprodutos da degradação dos componentes da biomassa lignocelulósica, como o furfural, o HMF e o ácido acético. Esta fração é destinada ao processo de fermentação 2G. A fração sólida é enviada para a etapa de cogeração para ser queimada na caldeira. É importante ressaltar que a fração de bagaço desviada da cogeração e enviado para a etapa 2G é modelada de forma a maximizar a produção de etanol e ao mesmo tempo atender a demanda térmica da planta.

A propagação das leveduras é o primeiro processo para se obter elevadas concentrações de células para o processo de fermentação do mosto proposto por Perez et al. (2022). O meio de cultura é o componente que fornece nutrientes para o crescimento e desenvolvimento dos microrganismos e era composto por fontes de carbono (glicose e xilose) e extrato de levedura.

O extrato de levedura é considerado uma excelente fonte de nitrogênio, é rico em diferentes proteínas, aminoácidos e vitaminas, entre outros elementos estimulantes para crescimento de microrganismos (ALEXANDRE, 2011; HAKOBYAN, 2012), entretanto é um item limitado pelo elevado preço de mercado (DUARTE et al., 2008). O extrato de levedura pode ser produzido por diversos métodos de autólise, plasmólise e hidrólise. Independente do método, o objetivo principal é realizar o rompimento da parede celular da levedura, para obter o conteúdo do interior da célula (ZAREI; DASTMALCHI; HAMZEH-MIVEHROUD, 2016). Visando reduzir alguns custos processuais e obter um dos componentes principais do meio de cultura, o presente trabalho optou pela produção de extrato de levedura *in loco* na biorrefinaria através do método de autólise da levedura. A autólise é um processo irreversível e que acontece de forma natural ao final da fase estacionária do crescimento da levedura, devido ao envelhecimento natural da célula (ALEXANDRE, 2011). Apesar disto, o processo de autólise

pode ser induzido por meio de métodos físicos, como é o caso do processo proposto por Alves et al. (2021) utilizando ácido sulfúrico, o qual foi incorporado na presente biorrefinaria.

O microrganismo, matéria-prima principal do extrato de levedura, é obtido por meio do setor 1G da biorrefinaria. Durante o processo de reciclo de levedura no setor 1G, para manter a qualidade e equilíbrio fermentativo (para reduzir contaminação, manter a mesma quantidade de células e a viabilidade da mesma) (FALEIRO; CARVALHO, 2021), é retirado/descartado uma parcela de células do setor 1G. Essa parcela é direcionada a um reator por onde passará por um processo de autólise. Segundo Alves et al. (2021) a cada 10 g de levedura *Saccharomyces cerevisiae* com 75% de umidade, são adicionados 25,8 ml de água e 100µL de H₂SO₄ (98% de pureza). O extrato de leveduras consiste na fração solubilizada do conteúdo da levedura que foi centrifugada e direcionada ao processo de inoculação. Dessa forma, o extrato de levedura é adicionado a fontes de carbono (glicose e xilose) formando o meio de cultura para a propagação de células 2G (Figura 15). O meio de célula, 10% (v/v) de leveduras e 1 mg/mL de ampicilina na proporção de 4% (v/v) são conduzidos a um fermentador, onde ocorrerá a propagação do fermento. As células obtidas na propagação, foram centrifugadas do meio e destinadas a etapa de imobilização celular.

A imobilização das células, tem como uma de suas vantagens proteger as células contra a toxicidade dos inibidores contidos no composto hidrolisado, permitindo processos mais eficientes e maiores produtividades volumétricas (SOARESet al., 2022). No presente processo utilizou-se a imobilização em gel de alginato de cálcio. Após o processo de centrifugação, a biomassa celular concentrada é adicionada na proporção de 10% (m/m) a uma solução composta por alginato de sódio com concentração final de 1% (m/m). Para a formação das esferas de gel de alginato de cálcio, essa a suspensão foi gotejada em uma solução de coagulação de 0,25 M de CaCl₂. As esferas, obtidas após o processo de imobilização, foram destinados ao processo fermentativo 2G.

O hidrolisado hemicelulósico foi suplementado com ampicilina (1mg/mL) e CaCl₂ (4g/L), cuja função do antibiótico é prevenir as contaminações, uma vez que o processo de fermentação se baseia no ambiente industrial não estéril, enquanto o cloreto de cálcio é responsável por manter a integridade dos *beads* de células imobilizadas. Durante a preparação do mosto foi adicionado 1M de NaOH (hidróxido de sódio) ao hidrolisado como forma de ajustar o pH para valores acima de 5,0 e evitar a diminuição da viabilidade celular no processo (MILESSI et al., 2020a). O melão, advindo da etapa de concentração do caldo de cana foi

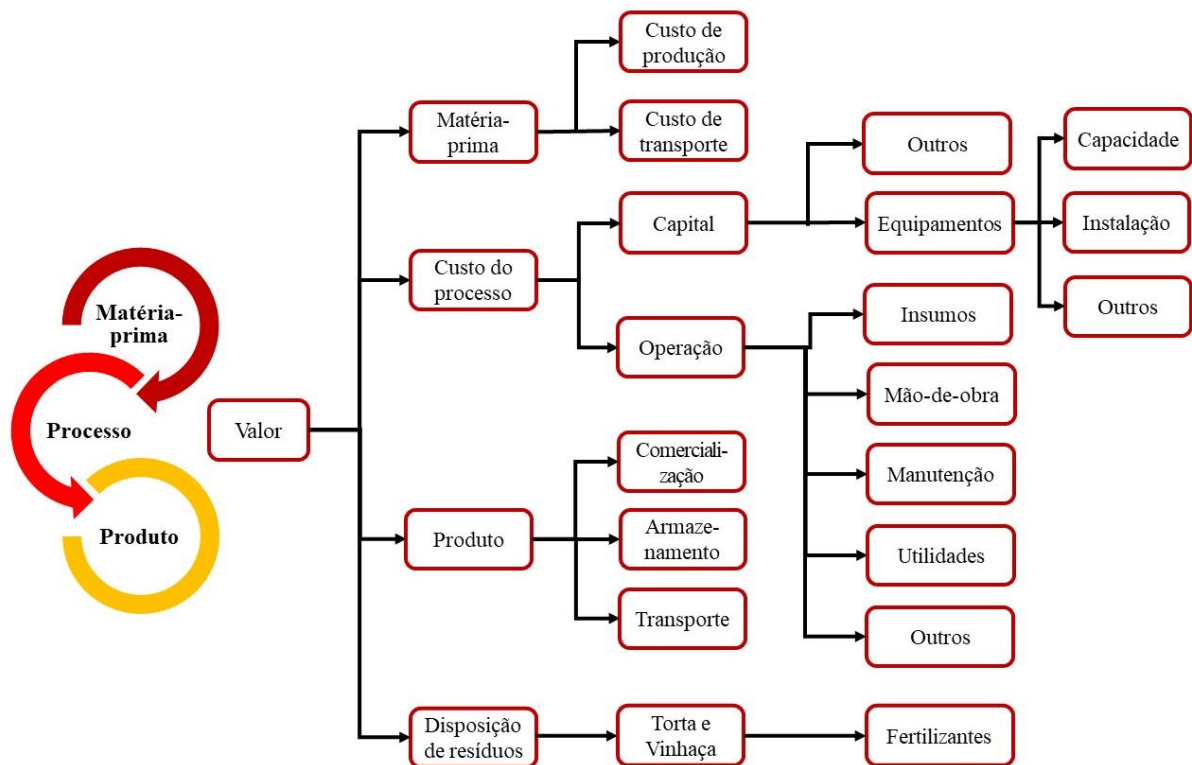
misturado ao hidrolisado hemicelulósico a fim de se obter concentração inicial de açúcares de 90,1 g/L, caracterizando a última etapa da preparação do mosto. Assim, para o processo de fermentação, as células imobilizadas são adicionadas em conjunto com o meio no reator de leito fixo na proporção de 1:1 (v/v). Como o processo é operado em bateladas repetidas, ao final de cada batelada, o meio fermentado é removido e novo meio fresco é adicionado, ficando as células retidas no reator. Assim, o vinho advindo da fermentação 2G é direcionado ao processo de purificação do processo 1G, onde o etanol será separado da vinhaça nas colunas de destilação e em seguida direcionado para a desidratação para obtenção do etanol anidro.

4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL

4.3.1 Avaliação Econômica

A ATE foi realizada neste trabalho com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica das tecnologias propostas. Esta é uma análise importante para avaliar a qualidade dos processos em uma biorrefinaria, identificando os processos promissores e projetos de investimentos (LINDORFER et al., 2019). A Figura 15 destaca os elementos chave de uma ATE.

Figura 16 – Principais elementos de uma TEA de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar



Fonte: Elaboração da autora.

A análise econômica, feita utilizando como indicador econômico o preço mínimo de venda do etanol (PMV), foi implementada no simulador de processos como EMSO. A Tabela 4 mostra os principais parâmetros econômicos que foram abordados na análise econômica deste trabalho.

Tabela 4 - Principais parâmetros econômicos assumidos para a ATE

(continua)

Parâmetros econômicos	Valor	Referência
Taxa mínima de atratividade por ano	11%	Longati et al. (2020)
Vida útil da planta	25 anos	Furlan et al. (2016)
Taxa de depreciação (Linear, 10 anos)	10%	Junqueira et al. (2017)
Taxa de cambio ¹	3,89 BRL/USD	Elias et al. (2021)

Tabela 4 - Principais parâmetros econômicos assumidos para a ATE

(conclusão)

Preço de insumos, matérias-primas e produtos	Valor	Referência
Etanol anidro ²	0,53 USD/L	CEPEA/ESALQ (2021)
Eletricidade ³	62,67 USD/MWh	CCEE (2021)
Cana de açúcar	17,80 USD/t	Elias et al. (2021)
Palha da cana-de-açúcar	7,71 USD/t	Dantas (2013)
Água	0,1943 USD/t	Elias et al. (2021)
Amônia	0,6 USD/kg	Elias et al. (2021)
H ₂ SO ₄ (98%)	0,24 USD/kg	ComexStat (2022)
NaOH	0,81 USD/kg	ComexStat (2022)
CaCl ₂	1,50 USD/kg	ComexStat (2022)
Ampicilina (antibiótico)	87,24 USD/kg	ComexStat (2022)
Alginato de cálcio	1,64 USD/kg	ComexStat (2022)
Glicose	0,3 USD/kg	Parra-Ramírez et al. (2018)
Xilose	0,4 USD/kg	Parra-Ramírez et al. (2018)
Extrato de levedura	6,65 USD/kg	Filipović et al. (2022)

¹ Média dos meses de dezembro de 2015 a dezembro de 2020² Média dos meses de dezembro de 2015 a dezembro de 2020³ Média dos meses de dezembro de 2015 a dezembro de 2020, valor corrigido pelo IPCA

t = tonelada

Fonte: Elaboração da autora.

O PMV representa o menor preço de venda de um determinado produto para que ele seja viável. Dessa forma, o indicador PMV corresponde ao menor preço de venda do etanol para que o mesmo seja viável no processo implementado. Para o seu cálculo, a equação do Valor Presente Líquido (VPL) é igualada a zero utilizando como a taxa de desconto a taxa mínima de atratividade (TMA, Tabela 4).

O VPL é um conceito muito utilizado na indústria na avaliação econômica de investimentos industriais, indicando se os projetos são viáveis. De acordo com Peters, Timmerhaus; West (2003), o VPL de um investimento é determinado pela soma de todos os fluxos de caixa de um projeto, levando em consideração seu valor no período inicial. O fluxo de caixa é o resultado do balanço de recursos financeiros do projeto com base no período de operação avaliado. O VPL foi calculado de acordo com a Equação (1) (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003):

$$VPL_{(X_1, X_2, \dots, X_i)} = -CAPEX_{(X_1, X_2, \dots, X_i)} + \sum_{j=1}^N \frac{CashFlow_{(X_1, X_2, \dots, X_i)}}{(1+r)^j} \quad (1)$$

Onde r é a taxa de desconto, N é o tempo de vida do projeto, CAPEX é o custo capital, *CashFlow* é o fluxo de caixa, (X_1, X_2, \dots, X_i) são funções das variáveis dos processos que por meio destas calculou-se a dimensão e os custos dos equipamentos, os fluxos e custos das matérias-primas e insumos.

O PMV foi determinado pela Equação 2, onde o VPL (Equação 1) é igual a zero e a taxa r é a TMA.

$$VPL_{(r = TMA, P_i)} = 0 \quad (2)$$

Segundo Peters; Timmerhaus; West (2003) o PMV considera não só os custos diretos, como também os custos indiretos, podendo citar como exemplo os impostos e o retorno sobre o investimento. Para mensurar o Preço Mínimo de Venda de Etanol do setor 2G (PMV 2G) foi utilizada a Equação 3, descrita por Macrelli et al. (2012).

$$PMV_{2G}^i = \frac{F_{1G2G} \times P_{1G2G}^i - F_{1G} \times P_{1G}^i}{F_{1G2G} - F_{1G}} \quad (3)$$

Onde P_{2G}^i é a contribuição do item i no custo de produção de etanol 2G; P_{1G2G}^i e P_{1G}^i são os custos de produção do item i ; F é a quantidade de etanol produzido em cada processo. O PMV do etanol 2G é consiste na razão entre a diferença dos custos 1G2G e 1G e o aumento da produção de etanol.

4.3.2 Avaliação Ambiental

O objetivo e escopo deste trabalho consiste na produção de etanol em uma biorrefinaria integrada 1G2G conforme descrita no item 4.2.3, onde foi avaliado o desempenho ambiental da produção do etanol. A unidade funcional adotada foi 1 MJ de etanol e o método de alocação selecionado foi o energético.

Os parâmetros e dados que compõem este trabalho são baseados em: Longati (2018) e Longati et al. (2019) para os parâmetros técnicos e econômicos do setor 1G; Milessi et al.

(2020b) com parâmetros técnicos de imobilização celular do setor 2G; Elias et al. (2021b), Elias et al. (2021a) e Elias (2020) com parâmetros técnicos e econômicos do setor 1G e 2G ; Gilpin (2016) e Harding (2008) com parâmetros ambientais do setor 2G; Alves et al. (2021) e Perez et al. (2022) com parâmetros técnicos do setor 2G. As entradas e saídas do sistema, tanto de material como de energia, que representam o inventário, foram obtidas através de simulações realizadas no EMSO, para posteriormente serem aplicadas no *software* SimaPro, nos inventários disponíveis, como *Ecoinvent 3*, para a realização da análise ambiental. As principais emissões para atmosfera foram estimadas através do setor de cogeração (queima da palha, bagaço e os sólidos 2G na caldeira), fermentação e destilação de etanol.

O método de avaliação dos impactos ambientais utilizado foi o CML Baseline 2000, por ser um método que cobre categorias importantes de impacto ambiental, que vem sendo aplicado com sucesso em bioprocessos, especialmente em biorrefinarias (ELIAS, 2020), englobando as seguintes categorias (Tabela 5): depleção abiótica (AD), acidificação (AC), eutrofização (EU), potencial de aquecimento global (GWP), depleção da camada de ozônio (ODP), toxicidade humana (HT), ecotoxicidade aquática da água doce (FWAET), ecotoxicidade aquática marinha (MAET), ecotoxicidade terrestre (TET) e oxidação fotoquímica (PO) ((BIRON, 2016; FURTADO, 2014a). A Tabela 5 demonstra as características das categorias de impacto, suas unidades de medida e as siglas utilizadas para identificação de cada categoria analisada neste trabalho.

Tabela 5 - Categorias de impacto do método CML Baseline 2000

(continua)

Categorias de Impacto	Sigla	Unidade de medida	Característica
Depleção abiótica	AD	quilograma equivalente de antimônio (Sb)	Representa o esgotamento de recursos não vivos (abióticos), como combustíveis fósseis, minerais, argila e turfa
Acidificação	AC	quilograma equivalente de dióxido de enxofre (SO ₂)	É o resultado da diminuição do pH e do aumento dos elementos tóxicos
Eutrofização	EU	quilograma equivalente de fosfato (PO ₄)	Ocorre quando a adição de nutrientes ao solo ou a água que leva ao aumento da biomassa, danificando outras formas de vida

Tabela 5 - Principais parâmetros econômicos assumidos para a ATE

(conclusão)			
Potencial de aquecimento global	GWP	quilograma equivalente de dióxido de carbono (CO ₂)	Caracteriza a contribuição da emissão de GEE na atmosfera para o aquecimento global
Depleção da camada de ozônio	ODP	quilograma equivalente de clorofluorcarboneto (CFC-11)	Destruição da camada de ozônio por átomos de cloro e bromo da atmosfera quando entram em contato com o ozônio
Toxicidade humana	HT	quilograma equivalente de 1,4 DB	Corresponde ao grau em que algo é capaz de produzir doenças ou danos a um organismo exposto
Ecotoxicidade aquática da água doce	FWAET	quilograma equivalente de 1,4 DB	
Ecotoxicidade aquática marinha	MAET	quilograma equivalente de 1,4 DB	
Ecotoxicidade terrestre	TET	quilograma equivalente de 1,4 DB	
Oxidação fotoquímica	PO	quilograma equivalente de etileno ou eteno (C ₂ H ₄)	É o resultado de das reações entre NO _x e compostos orgânicos voláteis sob a ação da luz solar

Fonte: Adaptação de Longati (2018), Biron (2016) e Furtado (2014).

Mediante a estas diferentes categorias de impactos, a interpretação e discussão dos resultados foram realizados utilizando como base os objetivos e o escopo definido previamente. Dessa forma, a avaliação ambiental foi utilizada para comparar a produção de etanol e os seus impactos em diferentes cenários propostos para estudo.

4.3.3 Cenários estudados

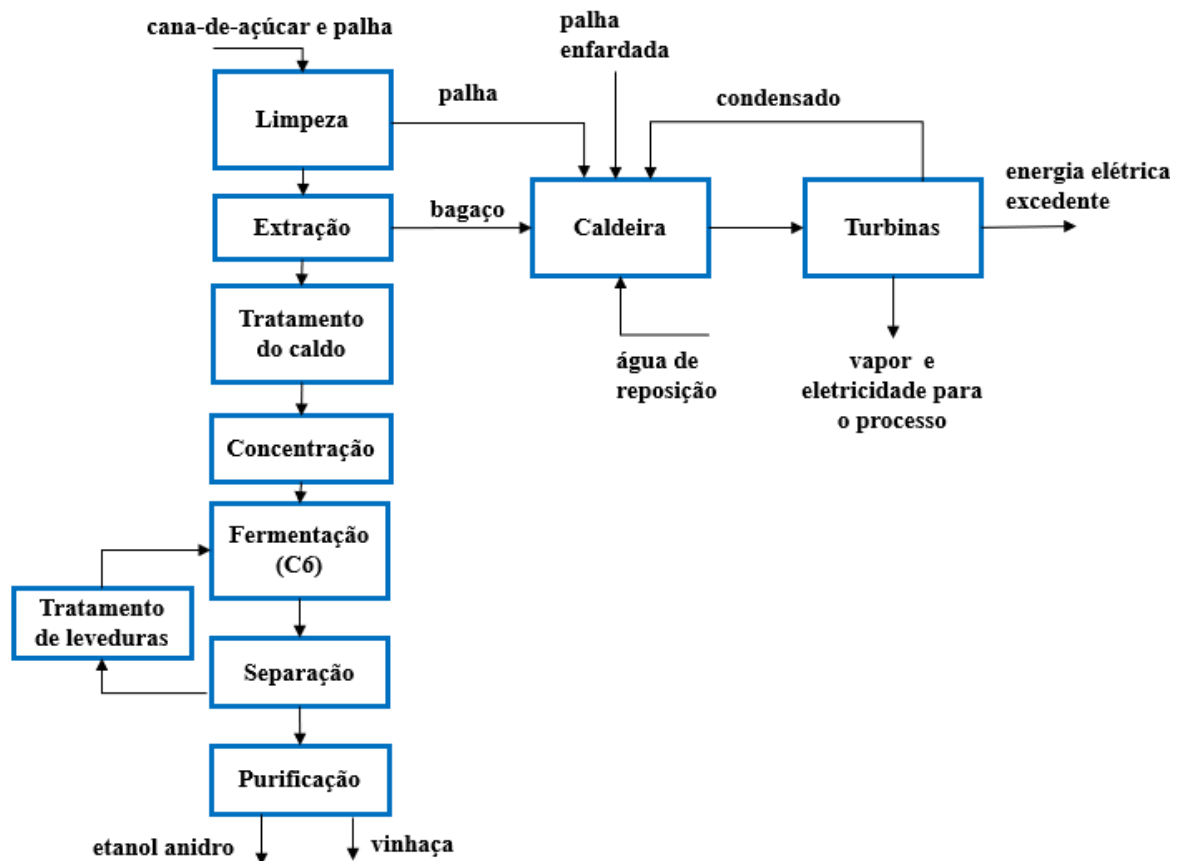
Para realizar os estudos de caso do trabalho, duas simulações de biorrefinarias com a integração da tecnologia 1G e 2G para a produção de etanol foram realizadas. O intuito principal consistiu em realizar análises comparativas da parte técnica, econômica e ambiental da biorrefinaria descrita no item 4.2.3 em diferentes cenários.

4.3.3.1 Cenário I

O primeiro cenário do estudo, Cenário I, foi modelado e simulado por Longati (2018), no software EMSO, abordando a produção de etanol 1G a partir da cana-de-açúcar em uma destilaria autônoma típica brasileira. As etapas do processo abordadas na simulação são

demonstradas na Figura 17, no qual o bagaço gerado na extração do caldo é totalmente direcionado para a etapa de cogeração.

Figura 17 - Fluxograma do Cenário I desenvolvido por Longati (2018)



Fonte: Elaboração da autora.

A biorrefinaria do Cenário I obtinha os dois principais produtos: o etanol e a eletricidade. O etanol é produzido por meio da fermentação alcoólica da sacarose do caldo de cana por ação da levedura *S. cerevisiae*, e a eletricidade pela queima do bagaço e da palha da cana na caldeira. Os seguintes parâmetros descritos na Tabela 6 foram utilizados para a simulação do Cenário I.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na simulação da biorrefinaria de cana-de-açúcar desenvolvida por Longati (2018)

Equipamento/Etapa	Variável/Parâmetro	Valor	Referência
Limpeza a seco	Perda de açúcares	0,50%	Fernandes (2011)
	Eficiência de remoção de impurezas minerais	70%	Jacaré (2008)
	Eficiência de remoção de impurezas vegetais	65%	Longati (2018)
Extração do caldo	Consumo de energia	16 kWh/t	Macedo (2001)
	Recuperação de açúcares	96%	Walter et al. (2008)
	Teor de umidade do bagaço	50%	Hugot (1986)
	Fluxo de água	30% m/m	Ensinas (2008)
	Temperatura de saída do caldo diluído	50°C	Ensinas (2008)
Tratamento do caldo de cana	Temperatura do caldo diluído (1° aquecedor)	70°C	Bonomi et al. (2012)
	Quantidade de óxido de cálcio (CaO) adicionada ao tanque de calagem	1,057 kg/t	Elias et al. (2021a)
	Temperatura do caldo diluído (2° aquecedor)	150°C	Elias et al. (2021a)
	Concentração de ácido fosforico	85%	Bonomi et al. (2012)
Decantação + torta de filtro	Temperatura de operação	97°C	Ensinas (2008)
	Eficiência de decantação dos sólidos insolúveis	99,70%	Bonomi et al. (2012)
	Concentração de sólidos no lodo	9%	Bonomi et al. (2012)
	Umidade da torta de filtro	70%	Elias et al. (2021a)
	Perda de açúcar na torta em relação ao lodo	1,80%	Elias et al. (2021a)
	Adição de bagaço no lodo	6-8 kg/TC	Longati et al. (2018)
	Adição de água no tambor rotativo	30 kg/TC	ANA (2009)
Concentração do caldo	Temperatura de operação	115°C	Chieppe Júnior (2012)
	Brix de saída do caldo	20° Brix	Chieppe Júnior (2012)
Fermentação 1G	Temperatura de operação	30°C	Longati et al. (2018)
	Eficiência de fermentação	90,50%	Longati et al. (2018)
Destilação	Pureza do etanol anidro	99,70%	Longati et al. (2018)
Cogeração	Temperatura do vapor de 65 bar	485°C	Longati et al. (2018)
	Eficiência da caldeira 65 bar	86%	Longati et al. (2018)
	Eficiência do gerador de energia	95,80%	Longati et al. (2018)

Fonte: Elaboração da autora.

Assim, todos os dados de entrada e saída da biorrefinaria do Cenário I foram simulados e identificados para estabelecer um inventário para realização da análise econômica e ambiental do processo como um todo e das etapas que compõem a estrutura da biorrefinaria. Todos os inventários utilizados no Cenário I para a realização da ACV foram retirados da base de dados do *Ecoinvent*, e analisados pelo método CML Baseline 2000, como demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais inventários utilizados na ACV do Cenário I

Matéria-prima	Inventário
Cana-de-açúcar	Sugarcane, CTBE BR
Bagaço - Pré-tratamento	Bagasse, from sugarcane {BR} cane sugar production with ethanol by-product Alloc Rec, S
Bagaço - Cogeração	Bagasse, from sugarcane {BR} heat and power cogeneration
Palha	Bagasse, from sugarcane {BR} heat and power cogeneration
Água	Longati (2018)
Ácido Fosfórico	Longati (2018)
Amônia	Longati (2018)
Cal	Longati (2018)
Ácido sulfúrico	Longati (2018)
Levedura	Yeast paste, CTBE BR
Monoetilenoglicol (MEG)	Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U
Floculante	Longati (2018)

Fonte: Elaboração da autora.

4.3.3.2 Cenário II

O Cenário II representa a biorrefinaria 1G2G descrita no item 4.2.3. Esta biorrefinaria integra na estrutura base 1G (descrita no Cenário I), a tecnologia 2G baseada no estudo realizado por Perez et al. (2022). A tecnologia 2G, que representa um grande avanço na produção de bioetanol, podendo ser usada em biorrefinarias ou ser adaptada para a aplicação em plantas industriais brasileiras, utiliza o pré-tratamento ácido do bagaço seguindo as informações de Antunes et al. (2015): ácido sulfúrico (98% de pureza) misturado ao bagaço na proporção de 100 mg de H_2SO_4 /g de bagaço seco a 121°C por 20 minutos, adotando a razão de 1:10 de sólido/líquido. Os principais parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na simulação da etapa 2G da biorrefinaria do Cenário II

Equipamento/Etapa	Variável/Parâmetro	Valor	Referência
Pré-tratamento ácido	Razão sólido/líquido	10%	Antunes et al. (2015)
	Proporção de ácido sulfúrico no pré-tratamento (g H ₂ SO ₄ /g bagaço)	0,1	Antunes et al. (2015)
	Temperatura de operação	121°C	Antunes et al. (2015)
	Tempo de reação	20 minutos	Antunes et al. (2015)
	Teor de umidade do filtro	50%	Elias et al. (2021b)
	Fração sólida do filtro	99,60%	Elias et al. (2021b)
	Concentração do caldo para melaço	Concentração final do melaço	88 g/L
Fermentação 2G	Temperatura de operação	35°C	Perez et al. (2022)
	Tempo de fermentação	120 minutos	Perez et al. (2022)
	Reposição celular por hora	0,3125 g/L	Perez et al. (2022)
Imobilização celular	% de CaCl ₂ na solução de imobilização	4% (v/v)	Perez et al. (2022)
	% de Alginato de cálcio na solução de imobilização	1% (v/v)	Perez et al. (2022)
	% de leveduras na solução de imobilização	10% (v/v)	Perez et al. (2022)
Produção de extrato de levedura	Porcentagem de levedura em água (m/v)	7.5	Alves et al. (2021)
	Proporção de ácido sulfúrico na autólise (µL H ₂ SO ₄ /g levedura seca)	10	Alves et al. (2021)
	Porcentagem de proteínas no extrato de levedura	69,87%	Alves et al. (2021)
	Temperatura de operação	60°C	Alves et al. (2021)

Fonte: Elaboração da autora.

Após a simulação, os dados de entrada e saída da biorrefinaria foram coletados para calcular as análises econômicas do processo (descritas detalhadamente no Apêndice A) e para serem inseridos no software SimaPRO® para as análises ambientais do processo. A Tabela 9 mostra os principais inventários utilizados no software para realizar a ACV.

Tabela 9 - Principais inventários utilizados para ACV no Cenário 2

Componente	Inventário
Hidróxido de sódio	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, U
Ampicilina	Harding (2008)
Cloreto de cálcio	Calcium chloride {RoW} market for calcium chloride Cut-off, U
Alginato de cálcio	Gilpin (2016)
Ácido sulfúrico	Sulfuric acid {RoW} market for sulfuric acid Cut-off, U

Fonte: Elaboração da autora.

4.3.3.3 Cenário III

O Cenário III foi derivado do Cenário II, no intuito de avaliar a utilização de outro processo de pré-tratamento da biomassa como via alternativa e ambientalmente mais amigável. Neste caso, o pré-tratamento ácido do bagaço de cana foi substituído pelo pré-tratamento hidrotérmico. Este pré-tratamento apresenta uma menor produção de compostos inibidores (YANG; TAO; WYMAN, 2018), fornecendo maiores rendimentos de açúcares da hemicelulose e digestibilidade da celulose, com condições de operação que variam entre 140°C a 240°C por até 20 minutos (EWANICK; BURRA, 2010), em pressões menores que 5MPa (XIMENES et al., 2017)

Nesta configuração, o bagaço é pressurizado e misturado com água na fase líquida em alta pressão e temperatura, como destacada na Tabela 10, onde são destinados ao reator de pré-tratamento. Após a alteração da biomassa, o efluente é despressurizado e neutralizado com amônia (ELIAS, 2020). A amônia tem o papel de neutralizar o efluente pré-tratado, devido ao seu pH estar entre a faixa de 4-5 (XIMENES et al., 2017), contendo ácidos orgânicos liberados dos componentes lignocelulósicos da biomassa. A amônia, de natureza básica, é utilizada ao invés da cal ou do NaOH, por ser considerada uma opção mais econômica e ambientalmente amigável (YANG; TAO; WYMAN, 2018).

Assim, o efluente pré-tratado e neutralizado é enviado ao filtro de esteira, onde a fração líquida, é destinada a etapa de fermentação 2G, na qual será misturada ao melaço, enquanto a fração sólida é enviada para a caldeira, como combustível (ELIAS, 2020). Todos os parâmetros utilizados na simulação do pré-tratamento hidrotérmico encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Principais parâmetros técnicos do pré-tratamento hidrotérmico

Pré-tratamento	Variável/Parâmetro	Valor	Referência
Hidrotérmico	Pressão de operação	14,1 atm	Ximenes et al. (2017)
	Fração de sólidos	15% m/m	Assumido
	Temperatura de operação	195°C	Oliveira et al. (2018)
	Tempo de reação	10 minutos	Longati et al. (2018)
	Conversão da celulose em glicose	8,12%	Oliveira et al. (2018)
	Conversão de hemicelulose em xilose	46,53%	Longati et al. (2018)

Fonte: Elaboração da autora.

Todos os dados gerados neste Cenário foram coletados e separados por etapas de processo para realizar as análises econômicas e ambientais. Os principais inventários utilizados no software para realizar a ACV do cenário estão na Tabela 11. Vale ressaltar que calor e eletricidade são considerados no setor 1G da biorrefinaria.

Tabela 11 - Principais inventários utilizados para ACV no Cenário 3

Componente	Inventário
Amônia	Ammonia, anhydrous, liquid {RER} market for ammonia, anhydrous, liquid Cut-off, U
Água	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U

Fonte: Elaboração da autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Buscando avaliar a viabilidade do processo desenvolvido por Perez et al. (2022), por meio dos dados obtidos nos cenários estudados, duas seções são apresentadas: a primeira, o processo de Perez et al. (2022) (Cenário II) é comparado diretamente com a biorrefinaria tradicional 1G (Cenário I) buscando analisar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais, assim como pontos críticos de processo que necessitam de melhorias; em seguida, o processo de Perez et al. (2022) é comparado utilizando-se diferentes pré-tratamentos da biomassa (Cenários II e III), visando avaliar o impacto da substituição desta etapa do processo na ATEA.

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS BIORREFINARIAS 1G E 1G2G (CENÁRIOS I E II)

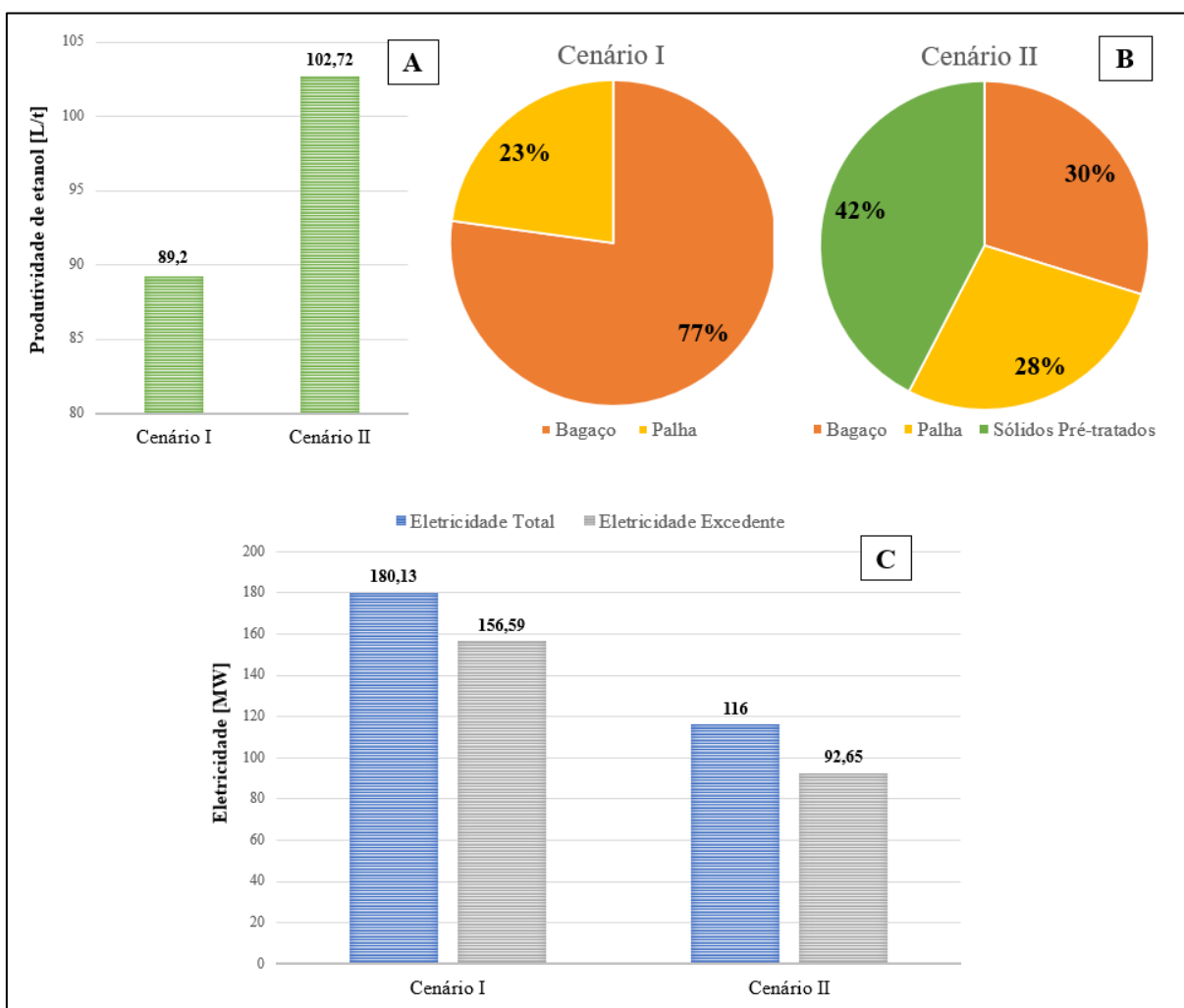
5.1.2 Análise técnico-econômica

O caso base 1G (Cenário I) consiste em uma unidade industrial típica brasileira que produz 89,91 litros de etanol anidro por cada tonelada de cana (74,84 m³/h), com capacidade de processar 833,33 toneladas de cana por hora durante 240 d/a. Este valor de produção é comparável a média das destilarias autônomas existentes no país, que produzem aproximadamente 85,2 L/t de cana (Junqueira et al. 2017). Esta planta é autossuficiente em energia elétrica, com a produção total de cerca de 180,13 MW de eletricidade, sendo 156,59 MW de energia excedente que é comercializada nas redes.

O caso 1G2G (Cenário II) contém a mesma capacidade de processamento de cana da biorrefinaria 1G (Cenário I). Uma fração do bagaço é (desviada da cogeração) enviada para a produção de etanol 2G (seguindo pelas etapas de pré-tratamento e fermentação 2G) e uma fração do caldo extraído (desviado da produção de etanol 1G) é destinado a produção de melaço, com o intuito de atender a demanda do processo desenvolvido por Perez et al. (2022). Ambos os desvios são determinados a partir da simulação de forma a maximizar a produção de etanol total. Dessa forma, é direcionado para o processo 2G a maior quantidade de bagaço possível e que ao mesmo tempo seja enviada para a cogeração bagaço suficiente para suprir a demanda térmica da planta. A fração de bagaço destinada ao setor de pré-tratamento foi 68% de todo o bagaço gerado no processo e a fração do caldo que foi destinada a produção de melaço no setor 2G da usina corresponde a 74% do caldo tratado. Assim, como o objetivo era maximizar a produção de etanol, um aumento de 13% na produção de etanol (Figura 18A) e uma redução de

41% na produção de energia elétrica excedente (Tabela 12) foram obtidos. Os custos com equipamentos (incluindo as instalações, tubulações, construções, entre outros) em cada etapa de produção da biorrefinaria nos cenários avaliados (Cenário I e Cenário II) são exibidos na Tabela 12.

Figura 18 – (A) Produtividade de etanol dos cenários avaliados. (B) Composição do combustível da caldeira em função da vazão [kg/h]. (C) Eletricidade total e excedente produzida nas unidades industriais.



Fonte: Elaboração da autora.

Tabela 12 – Custos diretos fixos da planta nos casos base

	Cenário I	Cenário II
Parâmetros		
Produção de etanol anidro (m ³ /h)	74,84	85,60
Eletricidade excedente (MW)	156,59	92,65
Investimento industrial (Custo Direto Fixo) (US\$ * 10⁶)		
<i>Setor 1G</i>		
Recepção da palha da cana	2,30	2,30
Recepção da cana de açúcar + extração do caldo	34,53	34,53
Evaporação do caldo	1,55	1,55
Produção de etanol (fermentação + destilação/desidratação)	49,73	53,90
Cogeração (vapor e eletricidade)	85,91	78,89
<i>Setor 2G</i>		
Pré-tratamento	-	1,09
Fermentação 2G	-	15,36
Propagação de levedura	-	1,85
Imobilização celular	-	0,40
Produção de extrato de levedura	-	1,15
Outros custos	1,87	2,73
Total (US\$ * 10⁶)	175,88	193,75

Fonte: Elaboração da autora.

É importante ressaltar que a etapa de cogeração do Cenário II utiliza os resíduos sólidos oriundos do pré-tratamento do processo 2G (fração da biomassa lignocelulósica não solubilizada na etapa de pré-tratamento, composto por celulose e lignina majoritariamente) como combustível de caldeira. Dessa forma, embora haja uma redução na quantidade de bagaço que é usado como combustível de caldeira no Cenário II, a demanda térmica da planta é garantida pelo resíduo lignocelulósico 2G. A Figura 18B mostra a distribuição percentual dos combustíveis utilizados na caldeira para cada um dos cenários, a Figura 18C mostra a energia elétrica gerada na planta e energia elétrica disponibilizada na rede.

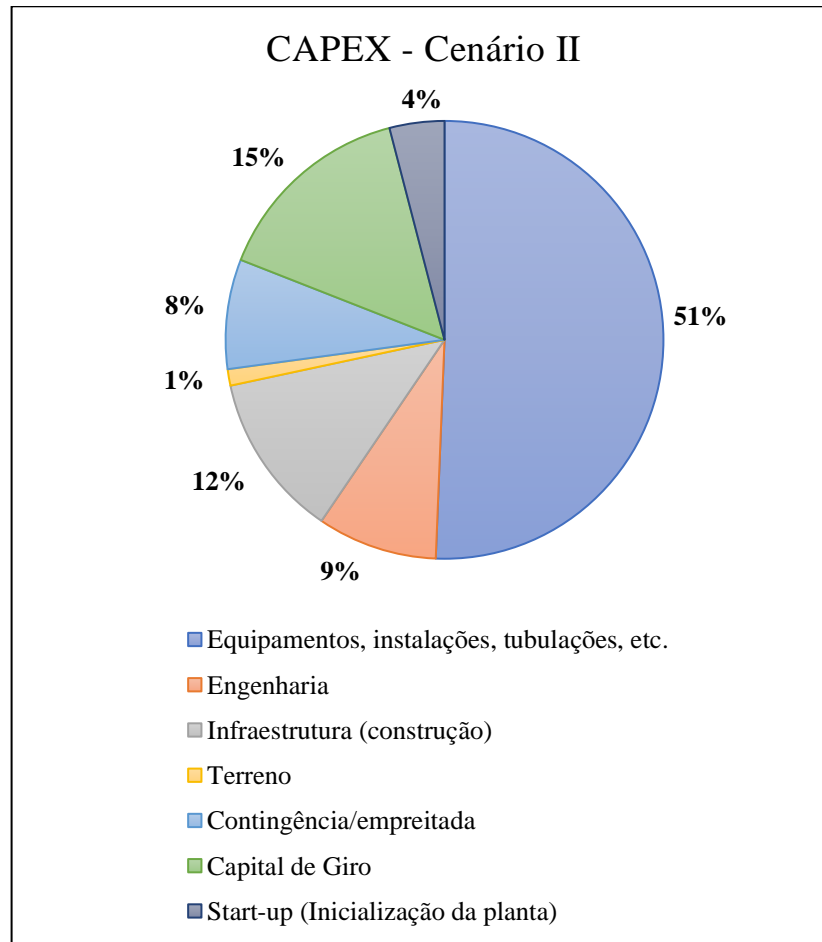
Ao comparar os cenários (Tabela 12), constatou-se que a integração da planta 2G na planta 1G resultou em um aumento de 14,38% na produção de etanol, uma redução de 40,83% na produção de energia elétrica excedente e um aumento nos investimentos de 10,16%. O aumento de 10,16% dos custos fixos diretos da planta ao adicionar o setor 2G são devidas as etapas de pré-tratamento, propagação de inóculo, imobilização das leveduras, produção de extrato de levedura como meio de cultura, concentração do melão e fermentação 2G. Dentre

as etapas da planta 2G, a fermentação 2G foi a que apresentou o maior custo de investimento. Este valor é reflexo do investimento em cinco reatores necessários para realizar a produção do etanol 2G, de forma a obter 12,91 litros de etanol por tonelada de cana e 10,76 m³ de etanol por hora.

A comparação direta dos resultados deste trabalho com os trabalhos da literatura não é trivial, uma vez que a configuração de planta aqui proposta ainda não foi avaliada por outros autores. Longati et al (2018) apresentaram um aumento na produção de etanol de 23,5% ao integrar o processo 2G no processo 1G. No trabalho realizado por Furlan et al. (2015) o aumento na produção de etanol 2G foi de 20,4% ao comparar o processo integrado 1G2G com o processo 1G. Entretanto, é importante destacar que em ambos os trabalhos destes autores (Longati et al (2018) e Furlan et al. (2015)) consideram a produção de etanol utilizando ambas as frações de açúcares fermentescíveis (C5 e C6) obtidas através do pré-tratamento hidrotérmico do bagaço. Dessa forma, uma maior quantidade de açúcar está disponível para a produção de etanol 2G.

O CAPEX da unidade industrial integrada 1G2G (Cenário II) foi estimado como US\$ 382.610.000,00, de acordo com os cálculos e informações do Apêndice A. Em seu cálculo, são considerados os custos de investimentos em equipamentos e seus periféricos (a instalação do equipamento, tubulações, controle, etc.) e outros custos como destacado na Figura 19.

Figura 19 - Custo de investimento da unidade industrial do Cenário II



Fonte: Elaboração da autora.

A maior parcela deste CAPEX é referente aos equipamentos e seus periféricos representando 51% do investimento total, seguido do capital de giro e da infraestrutura. O capital de giro corresponde a uma reserva de dinheiro que a biorrefinaria deve ter para quitar os custos operacionais, despesas pontuais para se manter operando regularmente ao longo do tempo. Os custos operacionais, como definidos no Apêndice A, são todas as despesas que estão atreladas a produção ou com os equipamentos físicos do processo, são exibidos na Tabela 13 e Figura 20.

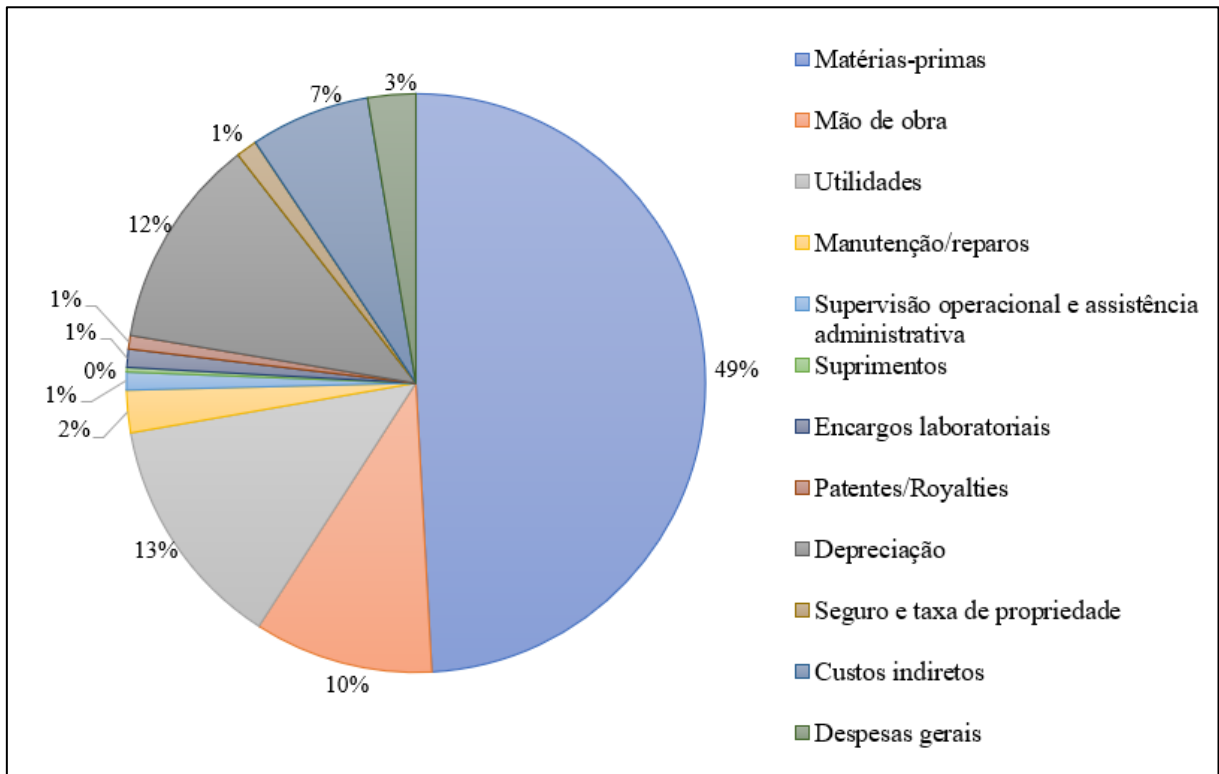
Tabela 13 - Custo operacional da unidade industrial nos cenários avaliados (US\$ * 10⁶).

Custo Operacional	Cenário I	Cenário II
Matérias-primas	109,23	128,65
Mão de obra	20,29	26,18
Utilidades	11,22	34,38
Manutenção/reparos	5,62	6,19
Supervisão operacional e assistência administrativa	2,03	2,62
Suprimentos	0,56	0,68
Encargos laboratoriais	2,03	2,66
Patentes/Royalties	1,47	1,97
Depreciação	28,12	30,97
Seguro e taxa de propriedade	2,81	3,10
Custos indiretos	13,97	17,50
Despesas gerais	5,59	7,00
Total (US\$ * 10⁶)	202,94	261,89

Fonte: Elaboração da autora.

De forma geral, a adição do setor 2G na infraestrutura 1G ocasionou o aumento de 23,16 milhões de dólares nos custos operacionais do Cenário II quando comparado ao Cenário I (Tabela 13). Isso se deve ao fato de que o Cenário II apresenta maior quantidade de operações unitárias para a produção do etanol 2G (etapas de pré-tratamento, propagação de inóculo, imobilização das leveduras, produção de extrato de levedura como meio de cultura e fermentação 2G). Dentre os custos operacionais, um aumento de cerca de 18% nos custos de matérias-primas foi observado. Isso se deve principalmente devido ao maior consumo de insumos nas etapas do processo 2G (principalmente os insumos da imobilização celular e o ácido no pré-tratamento). Além disso, as utilidades, que são responsáveis por fornecer e remover energia do processo, obtiveram um aumento de 68% no Cenário II em relação ao Cenário I. Isso corresponde aos insumos necessários na biorrefinaria para a operação dos sistemas e equipamentos de geração de vapor, ar comprimido, sistema de cogeração e refrigeração, além dos trocadores de calor dos processos.

Figura 20 - Custo operacional da unidade industrial do Cenário II



Fonte: Elaboração da autora.

Os custos envolvidos com matéria-prima são responsáveis pelos principais custos do OPEX em ambos os cenários, representando 54% do OPEX no Cenário I e 49% no Cenário II (Figura 20). Em seguida, tem-se os custos com utilidades (13% do OPEX), depreciação (12% do OPEX) e mão de obra (10% do OPEX). Nota-se que em ambos os cenários, a cana-de-açúcar continua sendo o maior contribuinte dos custos de matéria-prima (Tabela 14). O aumento do consumo de 15% com os custos de matérias-primas ao comparar o Cenário II com o Cenário I ocorreu principalmente em função do aumento do número de operações unitárias e, conseqüentemente, o aumento do consumo de insumos. Dentre os insumos consumidos no setor 2G, destaca-se aqueles relativos à imobilização celular (Tabela 14), os quais são responsáveis por 57% dos insumos do setor 2G. Isso ocorre devido a quantidade consumida de alginato de cálcio e cloreto de cálcio durante o processo de imobilização (216,08 kg/h e 864,33 kg/h com seus respectivos preços 1,50 US\$/kg e 1,65 US\$/kg, (COMEXSTAT, 2022).

Tabela 14 – Custo das matérias-primas nos setores dos cenários avaliados

Custo da matéria-prima	Cenário I	Cenário II
Cana-de-açúcar (Incluindo a palha)	76,41	76,41
Setor 1G	32,82	37,53
Pré-tratamento	-	4,42
Fermentação 2G	-	1,24
Propagação de levedura	-	0,62
Imobilização	-	8,33
Produção de extrato de levedura	-	0,10
Total (US\$ * 10⁶)	109,23	128,65

Fonte: Elaboração da autora.

O PMV, que representa o preço de etanol que torna o VPL igual a zero a uma TMA fixada de 11%, no Cenário I foi estimado como 471,3 US\$/m³ (LONGATI et al., 2018), valor menor que o preço de venda do etanol considerado como 530 USD/m³ (Tabela 4). Esse resultado mostra que, conforme esperado, o processo de produção de etanol 1G é economicamente viável. O PMV do etanol 1G2G do processo do Cenário II foi determinado como 693,59 US\$/m³ e o PMV do processo 2G (calculado de acordo com Equação 4 do item 4.3.1.3) estimado foi 2239,01 US\$/m³. Esses resultados demonstram que embora o processo integrado seja promissor, eles ainda não economicamente viáveis, uma vez que os valores de PMV são superiores ao preço de venda do etanol calculado (530 USD/m³): um custo de 163,59 USD/m³ a mais para o etanol 1G2G e de 1709,01 USD/m³ para o etanol 2G. É importante ressaltar, que embora o processo tenha se mostrado inviável, um aumento em 30,8% no preço de venda do etanol seria suficiente para tornar o processo 1G2G viável. Levando em conta a volatilidade do mercado de vendas do etanol dos últimos anos (entre os valores de 421 USD/m³ a 659 USD/m³) e da eletricidade (entre os valores de 9,56 USD/MW a 156,98 USD/m³), considerar a produção de etanol 1G2G neste contexto é uma hipótese razoável.

Estes resultados são comparáveis com outros encontrados na literatura (Longati et al., 2018; Furlan et al. 2015). Furlan et al. (2015) encontraram o PMV de 498,4 US\$/m³ para o processo 1G e de 529,6 US\$/m³ para o processo integrado 1G2G, onde todo o etanol produzido era obtido a partir do setor 1G (com a fermentação das hexoses do caldo da cana) e do setor 2G (com a fermentação das pentoses e da parte celulósica da biomassa). Entretanto, com o PMV do processo integrado acima da média do preço do etanol realizada entre janeiro de 2003 a dezembro de 2012 (513,7 USD/m³), demonstrou que o processo integrado necessita de

melhorias processuais para tornar-se viável economicamente. Longati et al. (2018) realizaram um estudo de caso de uma biorrefinaria 1G2G que produz etanol a partir da fermentação das hexoses (do caldo de cana e da parte celulósica do bagaço da cana-de-açúcar) e das pentoses (fração hemicelulósica do bagaço da cana). Obtendo, dessa forma, o PMV do processo integrado a um valor de 566,07 USD/m³ e o PMV do setor 2G com o valor próximo a 1000 USD/m³. O valor de venda do produto obtido através do processo integrado encontrava-se acima da média do preço de etanol considerado no trabalho (471,2 USD/m³), o que acarretou a inviabilidade de implementação da planta industrial.

Analisando pelo ponto de vista econômico o processo proposto neste trabalho, a produção de etanol 1G2G apresenta um custo de operação e de investimento mais elevado quando comparado ao 1G, o que é esperado devido a adição do setor 2G na unidade industrial 1G. Entretanto, com o aumento dos custos operacionais, envolvendo desde a mão-de-obra até as despesas gerais da biorrefinaria 1G2G, o preço de venda do etanol para que se obtenha lucro nesta produção foi superior à média do preço de etanol. Assim, embora promissor, a produção de etanol 2G ainda necessita de melhorias processuais para adquirir um aumento nas receitas e diminuição de custos e despesas da biorrefinaria e, dessa forma, tornar-se uma unidade industrial economicamente viável capaz de competir com a produção de energia elétrica.

5.1.3 Avaliação ambiental

Uma avaliação ambiental comparativa foi realizada para os cenários analisados. Os fatores de alocação energética (Tabela 15) foram calculados em função dos produtos da biorrefinaria.

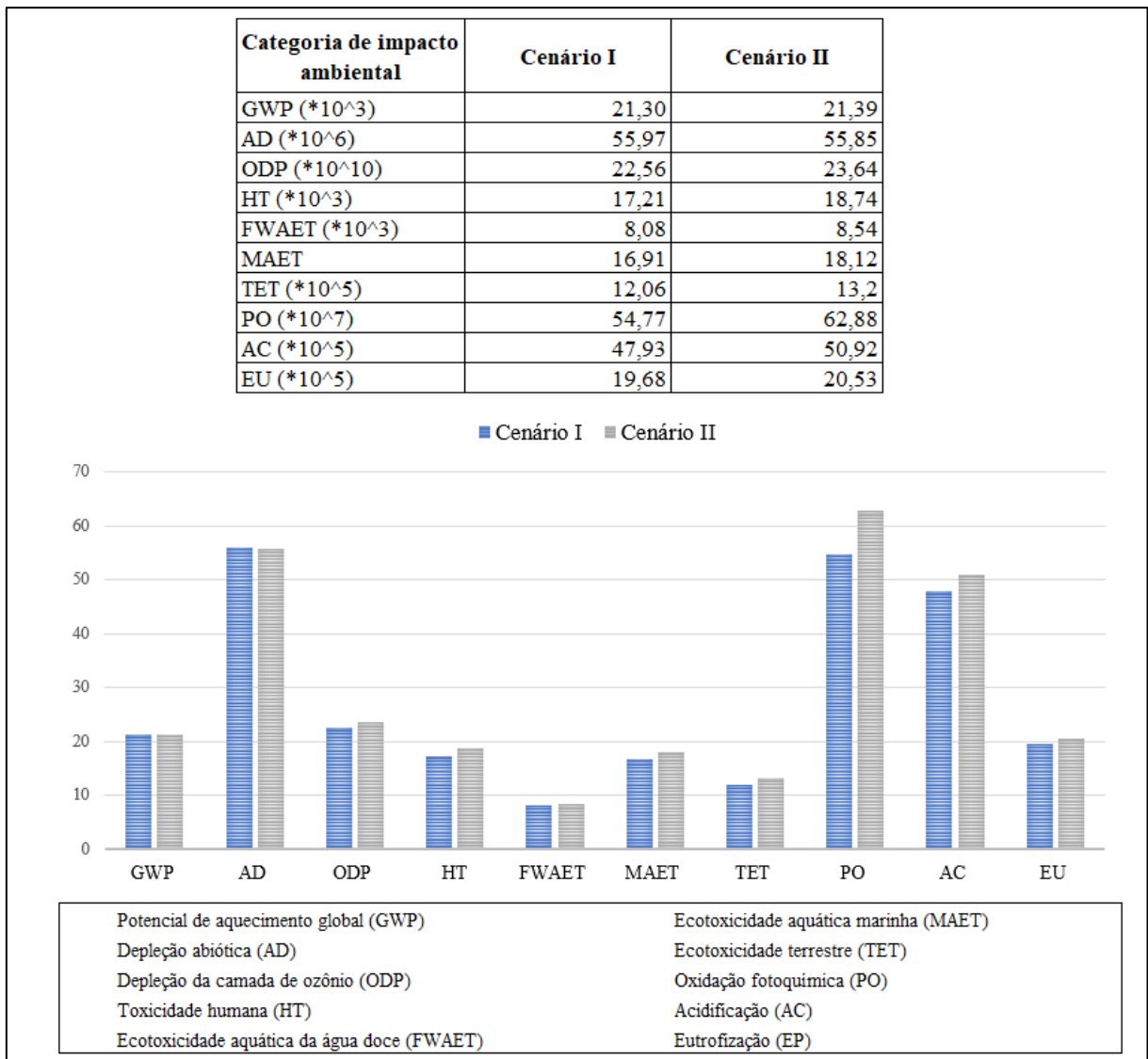
Tabela 15 – Saídas da produção de etanol e eletricidade, e fatores de alocação energética nos cenários avaliados

	Saída por MJ etanol (MJ de energia/MJ de etanol)		Fator de alocação energética dos produtos	
	Cenário I	Cenário II	Cenário I	Cenário II
Etanol	1	1	0,74	0,85
Eletricidade	0,34	0,18	0,26	0,15

Fonte: Elaboração da autora.

A energia total produzida em cada cenário avaliado corresponde a soma da energia do etanol (considerando PCI 28,2609 MJ/kg, (BRASIL, 2018)) e da eletricidade. Nota-se que a produção de etanol corresponde a 74% de toda a energia produzida na biorrefinaria 1G (Cenário I) e 85% na biorrefinaria 1G2G (Cenário II). Os resultados dos indicadores de impacto ambiental obtidos para os cenários avaliados podem ser vistos Figura 21.

Figura 21 – Resultados da ACV dos dois cenários avaliados



Fonte: Elaboração da autora.

Analisando os resultados, constatou-se um acréscimo sutil em quase todas as categorias de impacto ambiental nos cenários, com exceção das categorias PO e AC. O aumento mais

significativo entre as categorias de impacto, de 24%, ocorreu na categoria de impacto PO. Isso é explicado pelo fato de que o processo 1G2G utiliza maior quantidade de insumos durante o seu processo industrial que emitem maior quantidade de gases para o meio ambiente, com destaque para o ácido sulfúrico utilizado na etapa de pré-tratamento. A categoria de impacto AC apresentou um aumento de 6% quando comparado com o Cenário I em função, principalmente, a etapa de fermentação do setor 2G, que ao produzir mais etanol também aumentou a geração de CO₂.

Dias et al. (2012) compararam diferentes cenários para a produção de etanol, dentre eles uma destilaria autônoma de cana-de-açúcar, com queima de bagaço e palha da cana para a geração de eletricidade e vapor na planta; e um processo integrado de tecnologia 1G e 2G com a adição dos setores de hidrólise da celulose e fermentação de pentoses para a produção de etanol. Este último obteve maiores impactos ambientais, demonstrando a necessidade do desenvolvimento tecnológico da tecnologia 2G para melhorar pelo ponto de vista ambiental. Por outro lado, Elias (2020) realizaram uma ACV para dois cenários de produção de etanol (1G e 1G2G), e os resultados indicaram que a tecnologia 1G2G apresenta melhores indicadores ambientais que a tecnologia 1G, com exceção da categoria de impacto PO. Os autores consideram a produção de etanol 1G em uma destilaria autônoma típica brasileira e a produção de etanol 1G2G com as etapas de pré-tratamento hidrotérmico no bagaço da cana, hidrólise da celulose e fermentação da fração C5.

Em virtude do pressuposto, os resultados indicam que ainda são necessários melhorias nas condições operacionais da planta 1G2G na configuração proposta por este trabalho, de forma a deixar o processo mais eficiente e menos custoso, como reduzir o consumo de insumos, os custos de instalação dos equipamentos e os custos operacionais com utilidades, selecionar insumos e processos industriais que emitam menos poluentes, como por exemplo, o pré-tratamento e o processo de produção de extrato de levedura que utilizam o ácido sulfúrico.

5.2 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES PRÉ-TRATAMENTOS DA BIOMASSA PARA A BIORREFINARIA 1G2G (CENÁRIOS II E III)

5.2.1 Análise técnico-econômica

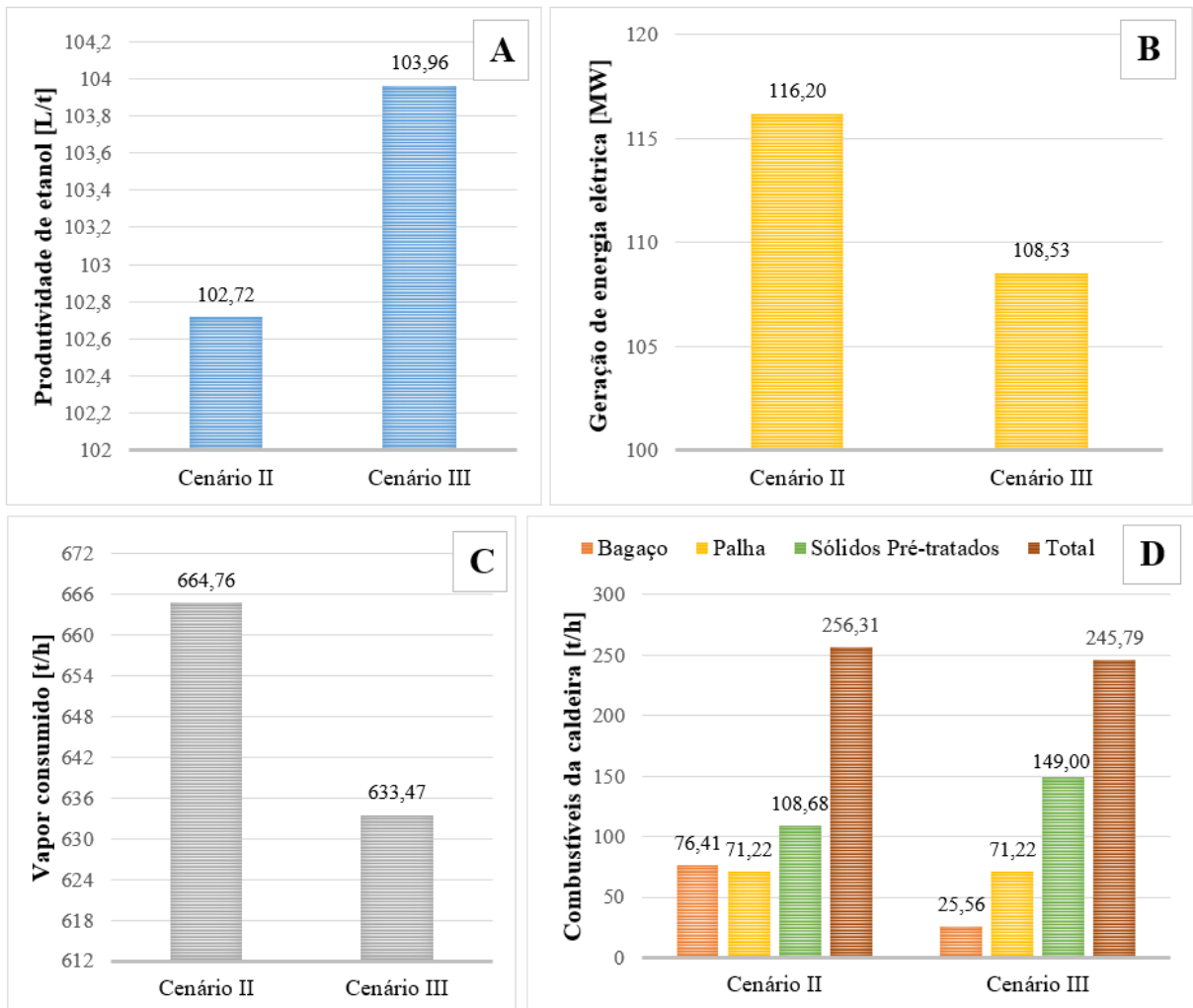
As biorrefinarias abordadas nos Cenários II e III são autossuficientes, produzindo vapor e eletricidade por meio da queima do bagaço, palha e sólidos removidos após a etapa de pré-

tratamento da biomassa. De todo o bagaço gerado na planta, cerca de 89% (valor calculado pela simulação para obter a maximização da produção de etanol na planta), é destinado ao setor de pré-tratamento, e 52% do caldo tratado no setor 1G é destinado ao setor 2G para produção de melaço.

Conforme pode ser visto nos resultados apresentados na Figura 22A, o processo representado pelo Cenário III obteve uma produção de etanol superior que o Cenário II em 1,21%, o que corresponde a 1,24 litro de etanol por tonelada de cana. Enquanto a geração de energia elétrica decresceu em 8% em relação ao Cenário III, o que corresponde a 7,66 MW a menos de eletricidade (Figura 22B). O aumento da produção de etanol é consequência da maior quantidade de açúcares fermentescíveis liberados no pré-tratamento hidrotérmico para a fermentação 2G, como destacado na Tabela 16, em torno de 3 g/L de xilose e 5,32 g/L de glicose a mais que o Cenário II. Dessa forma, o meio fermentativo 2G do Cenário III necessitou de uma fração menor de melaço, o que resultou em 22% a menos do caldo tratado do setor 1G para ser concentrado em melaço.

Apesar do pré-tratamento hidrotérmico consumir uma maior quantidade de vapor na planta que o pré-tratamento ácido, devido as elevadas temperaturas de operação e pelo processo de pressurização e despressurização dos equipamentos, o vapor consumido na planta industrial no Cenário II foi superior em 31,29 toneladas de vapor por hora (0,45 de vapor consumido por litro de etanol produzido na unidade industrial) que o Cenário III. Este aumento corresponde a produção de melaço para o processo fermentativo do setor 2G, que demanda uma maior quantidade de vapor para realizar a operação de concentração do caldo tratado do setor 1G (Figura 22C).

Figura 22 - (A) Produtividade de etanol nos cenários avaliados. (B) Geração de energia elétrica nas unidades industriais. (C) Vapor consumido na planta. (D) Combustíveis da caldeira em relação a vazão [kg/h].



Fonte: Elaboração da autora.

Tabela 16 - Composição do hidrolisado após a etapa de pré-tratamento da biomassa

Composição do hidrolisado (g/L)	Cenário II	Cenário III
Xilose	18,2	21,2
Glicose	1,3	6,6
Ácido acético	4,6	3,4
Hidroximetilfurfural (HMF)	0,006	0,037
Furfural	0,3	1,133
Referência	Perez et al. (2022)	Obtidos a partir da Tabela 10

Fonte: Elaboração da autora.

É possível observar também que o Cenário III liberou uma quantidade superior de compostos inibidores no pré-tratamento, correspondendo a 0,031 g/L a mais de furfural e 1,033 g/L a mais de HMF. Esses compostos são fruto da degradação dos açúcares da biomassa em altas temperaturas, sendo capazes de inibir o crescimento celular, danificar as membranas e paredes celulares, reduzir as atividades enzimáticas da levedura (DOĞAN et al., 2014; ZHANG et al., 2011), o que afeta negativamente o processo fermentativo. Apesar da presença dos inibidores no hidrolisado hemicelulósico estar em maior quantidade no Cenário III (Tabela 16), indicando uma menor disponibilidade de açúcares para o processo fermentativo, o Cenário III obteve uma maior produtividade em etanol em relação ao Cenário II em torno de 1,04 m³ de etanol por hora.

Nota-se que o Cenário III para a produzir etanol 2G utilizou uma quantidade superior de bagaço que o Cenário II (51 t/h) no setor de pré-tratamento que o Cenário II, como consequência, uma maior quantidade de sólidos pré-tratados foi disponibilizada como combustível da caldeira (em torno de 41 t/h), como observado na Figura 22D. Apesar disso, o Cenário III obteve uma redução de 11 toneladas por hora dos combustíveis na caldeira em relação ao Cenário II, o que resultou em uma produção inferior de eletricidade na planta industrial, como observado na Figura 22B.

Com os resultados obtidos na simulação do Cenário III dimensionou-se os equipamentos utilizados em cada etapa do processo proposto, além dos valores para as suas aquisições, como descritos no Apêndice A. Os custos com equipamentos (incluindo as instalações, tubulações, construções, entre outros) são exibidos na Tabela 17.

Tabela 17 - Principais parâmetros da unidade industrial e os investimentos industrial na aquisição de equipamentos, suas instalações e tubulações, entre outros.

	(continua)	
	Cenário II	Cenário III
Parâmetros		
Produção de etanol anidro (m ³ /h)	85,6	86,6
Eletricidade excedente (MW)	92,65	85
Investimento industrial		
Recepção da palha da cana	2,30	2,30
Recepção da cana de açúcar + extração do caldo	34,53	34,53
Evaporação do caldo	1,55	1,55
Produção de etanol (fermentação + destilação/desidratação)	53,90	54,29

Tabela 17 - Principais parâmetros da unidade industrial e os investimentos industrial na aquisição de equipamentos, suas instalações e tubulações, entre outros.

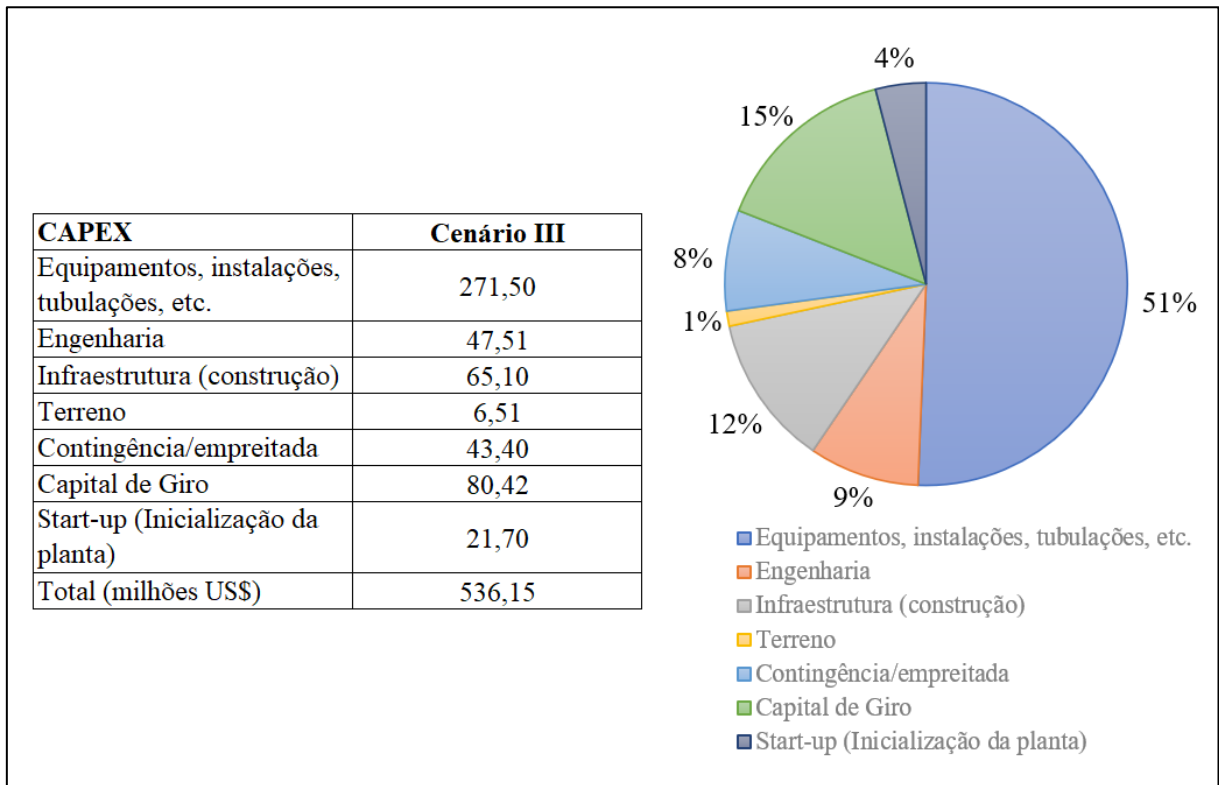
	(conclusão)	
	Cenário II	Cenário III
Investimento Industrial		
Cogeração (vapor e eletricidade)	78,89	76,29
Pré-tratamento	1,09	81,52
Fermentação 2G	15,36	12,41
Propagação de levedura	1,85	1,49
Imobilização celular	0,40	0,34
Produção de extrato de levedura	1,15	0,83
Outros custos	2,73	2,61
Total (US\$ * 10⁶)	193,75	268,17

Fonte: Elaboração de autora.

Comparando os cenários avaliados ressalta-se que o pré-tratamento hidrotérmico (Cenário III) cresceu em 80,43 milhões de dólares em relação ao pré-tratamento ácido (Cenário II) nos custos de investimento industrial. Isso é justificado principalmente pela tecnologia necessária para que o pré-tratamento hidrotérmico opere em altas pressões e temperaturas.

Além do custo de investimento em equipamentos, e seus periféricos (a instalação do equipamento, tubulações, controle etc.), outros custos da biorrefinaria 1G2G compõem o CAPEX, como destacado na Figura 23.

Figura 23 - Capital de investimento da biorrefinaria 1G2G do Cenário III

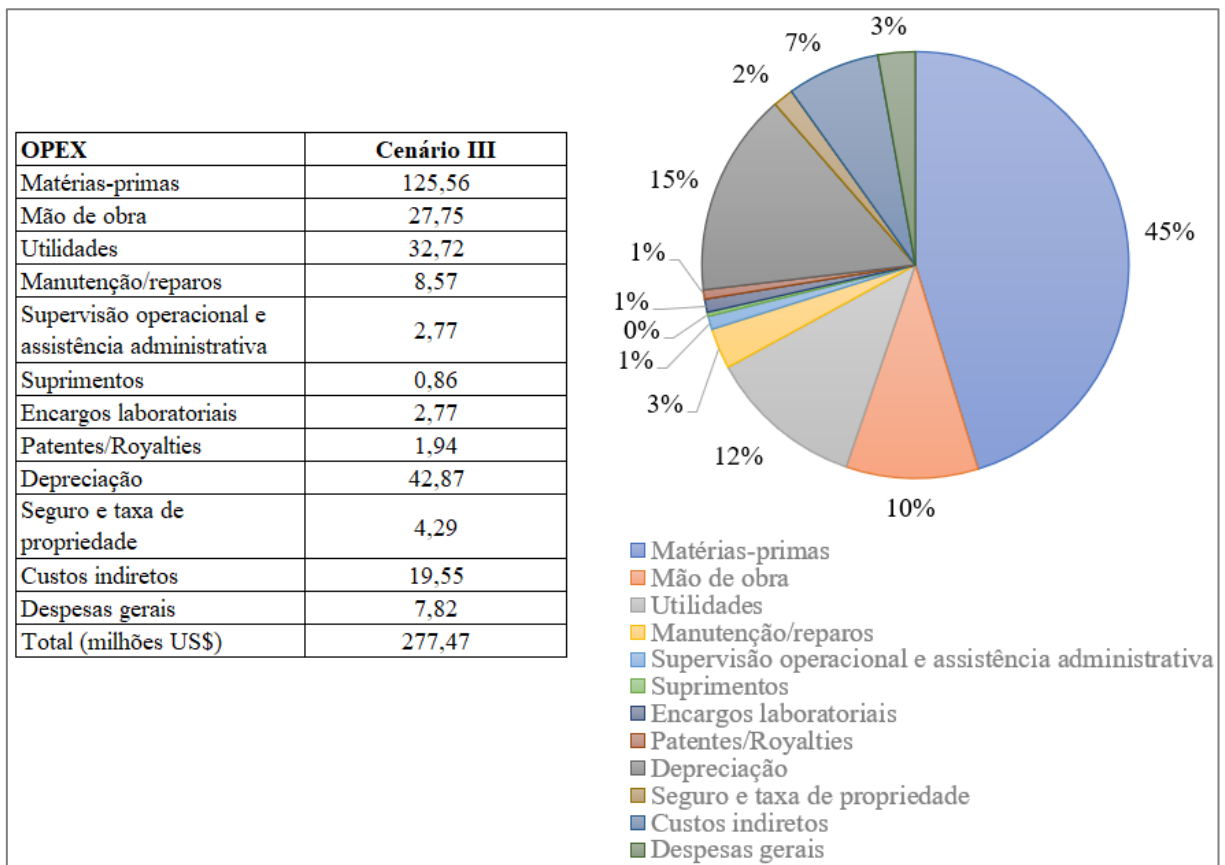


Fonte: Elaboração da autora.

O CAPEX da unidade industrial integrada 1G2G com pré-tratamento hidrotérmico (Cenário III) obteve o valor de US\$ 529.573.000,00, representando um aumento significativo de 28% (146,96 milhões US\$) do CAPEX do Cenário II. A maior contribuição para o CAPEX continua sendo aos equipamentos e seus periféricos com 51%, seguido do Capital de Giro e da Infraestrutura. O Capital de Giro corresponde aos custos necessários para a biorrefinaria se manter operando regularmente, ou seja, os custos de operação, enquanto a Infraestrutura é responsável por toda construção e estruturação da planta.

Os custos operacionais, OPEX, responsável pelos gastos nas despesas e dispêndios operacionais representam US\$ 274.474.000,00. Com um aumento de 6% (15,68 milhões de US\$) dos custos operacionais em relação ao Cenário II, exibidos na Figura 24.

Figura 24 - Custo operacional total do Cenário III



Fonte: Elaboração da autora.

Com o aumento da quantidade de equipamentos na estrutura da biorrefinaria, todos os custos operacionais atrelados a eles de forma direta ou indireta como mão-de-obra, manutenção e reparos, supervisão operacional, suprimentos (roupas, ferramentas, dispositivos de proteção, entre outros), depreciação, despesas gerais, entre outros custos, obtiveram um aumento de 18,67 milhões de US\$. Apesar da matéria-prima ser a maior contribuição do OPEX, com 45% dos custos, seu valor em relação ao Cenário II decresceu em 2%, correspondendo a 3,09 milhões de US\$ a menos no custo operacional total. Acontece que as matérias-primas utilizadas no processo de pré-tratamento hidrotérmico em maior quantidade, como a água, possui baixo custo de aquisição, como destacado na Tabela 18. Diferente do que acontece com o pré-tratamento ácido do Cenário II, onde o custo de aquisição do ácido sulfúrico, componente mais consumido, corresponde a 96% de todo o custo de matéria-prima do processo.

Tabela 18 - Custo de matéria-prima dos cenários avaliados no setor de pré-tratamento

Matéria-prima consumida	Custo da matéria-prima	Quantidade utilizada [t/h]	Custo total do setor (milhões US\$)
Cenário II			
Água	0,01 US\$/t	0,70	4,42
Ácido sulfúrico	0,23 US\$/kg	3,67	
Cenário III			
Água	0,01 US\$/t	473,89	3,51
Amônia	0,60 US\$/kg	1,15	

Fonte: Elaboração da autora.

Com base nas informações anteriores, o PMV foi calculado assumindo a taxa interna de retorno em 11% e o VLP igual a zero. O PMV do Cenário III foi estimado no valor de 785,47 US\$/m³, enquanto o PMV do setor 2G (conforme a Equação 4 do item 4.3.1.3) foi calculado como 2777,92 US\$/m³. Dessa forma, o Cenário III apresentou o preço mínimo de venda de etanol no processo integrado superior ao histórico de preço do etanol apresentado na Tabela 4 (530 USD/m³) em cerca de 255,47 USD/m³, demonstrando a inviabilidade do processo proposto, apesar de ser promissor.

Apesar de não conter configurações do Cenário III na literatura, outras configurações são encontradas para realizar uma comparação de processo. Moonsamy et al. (2022) realizaram uma análise técnico-econômica de diversos cenários de biorrefinaria 1G2G de produção de etanol para encontrar o cenário mais econômico para ser anexado em uma típica usina de açúcar sul-africana. O Cenário 1G2G em sua infraestrutura da biorrefinaria consta com os setores de pré-tratamento (explosão a vapor com a adição de um catalisador, dióxido de enxofre), fermentação de pentoses (xilose), fermentação 1G (somente de melaço), fermentação 2G (somente da celulose), produção de enzimas, tratamento de águas residuais e cogeração. A biorrefinaria em questão tem capacidade de produzir 22,6 m³/h de etanol e 24,9 MW de eletricidade excedente. O MESP combinado obteve o valor de 1360 US\$/m³, enquanto o MESP 2G de 1930 US\$/m³, representando valores que não são interessantes para a viabilidade do processo. Diferente do que acontece com Dias et al. (2013), que realizaram um estudo de integração de tecnologia 2G em uma destilaria autônoma de cana-de-açúcar. A planta proposta pelos autores tem capacidade de processar 500 toneladas de cana-de-açúcar por hora, produzir 121,7 litros de etanol anidro por tonelada de cana e 26,5 kWh de eletricidade excedente por

tonelada de cana com uma pressão 22bar na caldeira. A infraestrutura conta com setor de pré-tratamento (explosão a vapor), hidrólise da celulose, fermentação da xilose e glicose, cogeração, destilação e desidratação, tratamento de leveduras e cogeração, obtendo um valor de venda de etanol de 246 US\$/m³. Este valor é inferior à média do preço de etanol anidro (445 US\$/m³), indicando a viabilidade do processo integrado.

Analisando a planta do Cenário III, sob um ponto de vista econômico, a produção de etanol do setor 2G apresenta um custo muito mais elevado quando comparado o Cenário II, como comprovado nos resultados exibidos anteriormente. Isso ocorre devido ao pré-tratamento hidrotérmico conter um custo operacional e de investimento superior ao pré-tratamento ácido, o que encarece o valor do produto na produção. Apesar dos cenários integrados ainda necessitarem de melhorias processuais para adquirir a desejada viabilidade econômica para a implementação da unidade industrial integrada, o Cenário II está mais próximo da viabilidade econômica que o Cenário III pela proximidade do PMV do etanol com a média do preço de etanol.

5.2.3 Avaliação ambiental

Para investigar o potencial da produção de etanol em biorrefinarias com pré-tratamentos diferentes, os cenários avaliados foram comparados sob o ponto de vista ambiental. Os produtos principais das biorrefinarias analisadas são o etanol anidro e eletricidade. A alocação energética que divide a carga ambiental de um processo entre os produtos gerados na biorrefinaria foi destacada na Tabela 19.

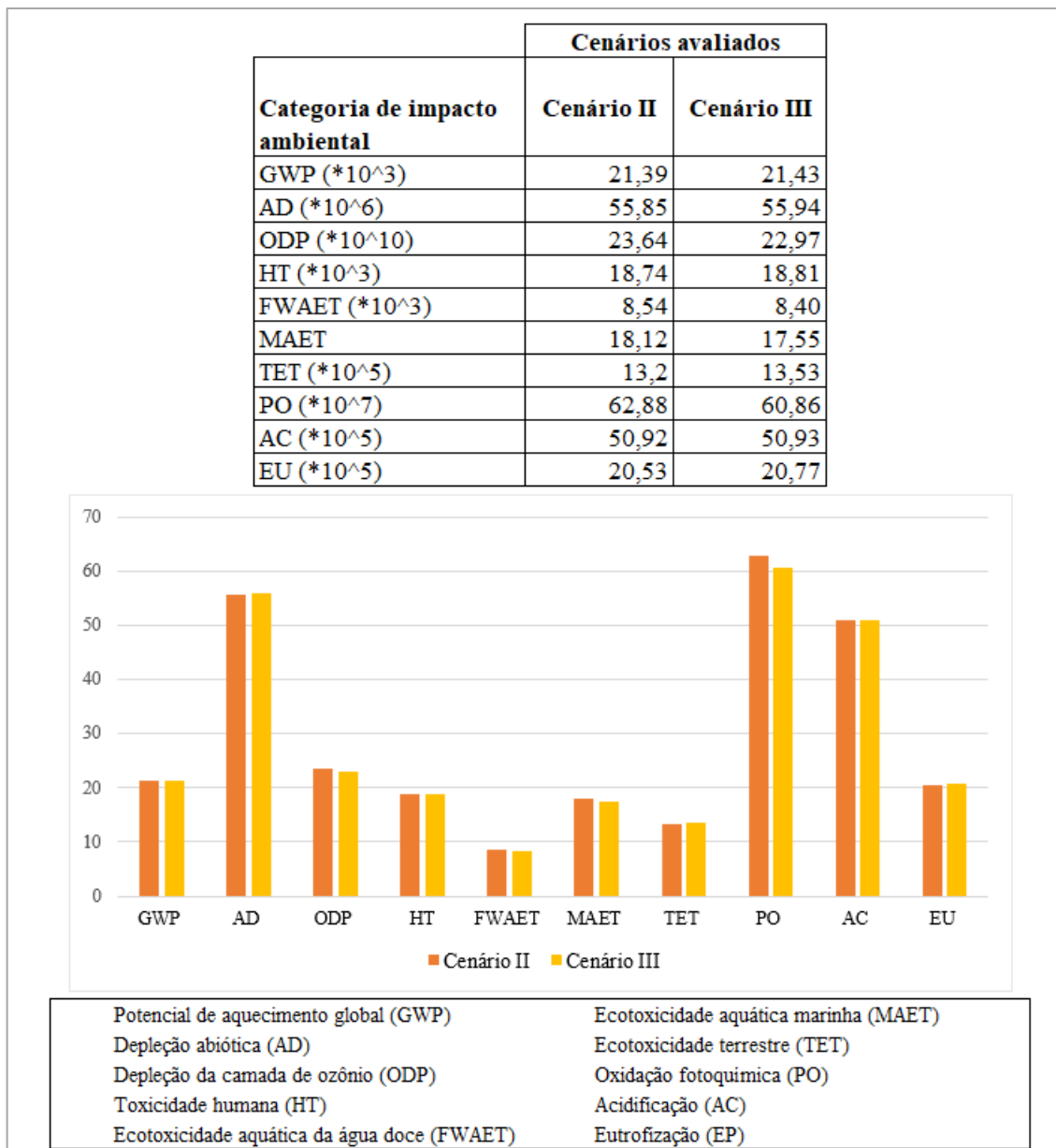
Tabela 19 - Saídas da produção de etanol e eletricidade, e fatores de alocação energética nos dois cenários avaliados.

	Saída por MJ etanol (MJ de energia/MJ de etanol)	Fator de alocação energética dos produtos
Etanol	1	0,86
Eletricidade	0,18	0,14

Fonte: Elaboração da autora.

A energia total produzida em ambas biorrefinarias são a soma da energia do etanol (considerando PCI 28,2609 MJ/kg (BRASIL, 2018)) e da eletricidade. Assim, a produção de etanol corresponde a 86% de toda energia produzida na unidade industrial, enquanto 14% correspondem a energia elétrica produzida. A Figura 25 relata os valores encontrados os indicadores de impacto ambiental nos cenários avaliados.

Figura 25 - Indicadores de impacto ambiental nos cenários avaliados na produção de etanol 1G2G



Fonte: Elaboração da autora.

Na Figura 25, foi possível observar que há uma diferença pequena entre os resultados da ACV dos cenários avaliados. A maior diferença dos dois cenários encontra-se nas categorias ODP, MAET e PO. A categoria ODP, que caracteriza a destruição da camada de ozônio, obteve um aumento de 2,9% no Cenário II em relação ao Cenário III, em função da utilização do ácido sulfúrico durante o processo pré-tratamento da biomassa. Este componente, ao ser liberado no meio ambiente, acelera a destruição do ozônio estratosférico, aumenta o aquecimento da superfície terrestre (HAZRA et al., 2019). Além disso, o uso desta substância química na biorrefinaria do Cenário II, corrobora não só com a contaminação dos ecossistemas aquáticos (como indicado na categoria MAET com um aumento de em 3,2% em relação ao Cenário III), como também auxilia na destruição da camada de ozônio e no aumento da acidez das chuvas (como demonstrado na categoria PO que obteve um aumento de 3,3% em relação ao Cenário III).

A amônia, utilizado como agente neutralizador do composto pré-tratado do processo hidrotérmico, por ser um composto nitrogenado pode aumentar a quantidade de óxidos nítrico e nitroso na atmosfera, provocando chuva ácida (indicando o aumento da categoria AC) e aumento da produção de gases de efeito estufa (indicado pela categoria, GWP). Além disso, quando liberada na atmosfera prejudica a qualidade do ar (indicada pela categoria TET), polui os corpos d'água (indicado pela categoria EU).

Com os resultados obtidos na análise ambiental, pode-se perceber que apesar do pré-tratamento hidrotérmico ser considerado ecologicamente correto (SARKER et al., 2021) e aumentar a produção de etanol em 1,21%, este método não obteve reduções tão significativas nos impactos ambientais. O que demonstra que o pré-tratamento ácido continua sendo vantajoso para toda a estrutura da biorrefinaria. Assim, para que o pré-tratamento hidrotérmico tenha suas vantagens ambientais, melhorias dentro do seu processo serão necessárias, como por exemplo, o uso de outro agente neutralizador do composto pré-tratado. Dessa forma, será possível produzir uma maior quantidade de etanol com menores impactos ambientais em uma infraestrutura ambientalmente viável.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho avaliou a implementação da metodologia Análise Técnico-Econômica e Ambiental (ATEA) em biorrefinarias de produção de etanol, conforme descrito no item 4.3. Esta análise foi utilizada para avaliar a potencial produção de etanol, com integração da tecnologia 1G e 2G, por meio da cofermentação do hidrolisado hemicelulósico do bagaço e do melaço da cana-de-açúcar em plantas industriais produtoras de etanol.

Com os resultados obtidos, nota-se que a adição do setor 2G ao processo 1G eleva ao mesmo tempo a produção de etanol e o custo operacional e de capital nas unidades industriais, devido ao aumento no CAPEX e OPEX. Como consequência, o preço de comercialização do etanol para se obter lucro ficou acima da média de preço de mercado (530 USD/m³), indicando a inviabilidade econômica da implementação do processo integrado em ambos os cenários (693,59 USD/m³ para o Cenário II e 785,47 USD/m³ para o Cenário III). Os resultados também mostraram que o processo 1G2G em ambos os cenários não apresentaram potencial necessário para mitigar os impactos ambientais em relação a produção de etanol 1G. Em outras palavras, o processo proposto, apesar de ser robusto e promissor para ser aplicado em escala industrial, não obteve os indicadores ambientais menores ou iguais ao do processo 1G, gerando produtos mais poluentes ao meio ambiente, indicando a inviabilidade ambiental do processo. Dessa forma, os resultados indicaram a necessidade de novas formas de produção de etanol a fim de obter uma melhor integração de processos nas biorrefinarias a base de cana-de-açúcar.

Diante dos resultados e das conclusões obtidas, cinco sugestões para trabalhos futuros foram sugeridas:

1. Realizar a análise de sensibilidade do processo para identificar quais as variáveis com maior impacto na parte econômica;
2. Desenvolver o processo de produção de açúcar para obter o melaço utilizado no processo proposto por Perez et al. (2022);
3. Ampliar o processo de produção de extrato de levedura, como forma de obter outro produto para ser comercializado pela planta industrial;
4. Avaliar outros processos de processo de pré-tratamento hidrotérmico, que utilizam outro elemento para neutralizar o efluente pré-tratado;
5. Integração da produção de biogás, como outra fonte de energia a biorrefinaria, e realizar a avaliação da viabilidade técnico-econômica e ambiental.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E. Energetic-environmental assessment of a scenario for Brazilian cellulosic ethanol. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 474–489, 2013.
- ALE, S. et al. Environmental impacts of bioenergy crop production and benefits of multifunctional bioenergy systems. Em: **Bioenergy with Carbon Capture and Storage**. [s.l.: s.n.]. p. 195–217.
- ALEXANDRE, H. Autolysis of Yeasts. Em: MOO-YOUNG, M. (Ed.). **Comprehensive Biotechnology**. 2nd. ed. [s.l.] Elsevier, 2011. p. 641–649.
- ALONSO, D. M.; WETTSTEIN, S. G.; DUMESIC, J. A. Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. **Chemical Society Reviews**, v. 41, n. 24, p. 8075–8098, 2012.
- ALVES, E. M.; DE SOUZA, J. F.; DE OLIVA NETO, P. Advances in yeast autolysis technology - A faster and safer new bioprocess. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 25, 2021.
- ALVIM, J. C. et al. Biorrefinarias: Conceitos, Classificação, Matérias Primas e Produtos. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 1, n. 3, p. 61–77, 2014.
- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. 1. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA); União da Indústria da Cana-de-açúcar (UNICA); Centro de Tecnologia Canavieira (CTC); Federação das Indústrias do estado de São Paulo (Fiesp), 2009.
- ANTONIO CARLOS FERNANDES. **Cálculos na Agroindústria de Cana-de-açúcar**. 3. ed. Piracicaba: STAB, 2011.
- ANTUNES, F. A. F. et al. Hemicellulosic Ethanol Production by Immobilized Wild Brazilian Yeast *Scheffersomyces shehatae* UFMG-HM 52.2: Effects of Cell Concentration and Stirring Rate. **Current Microbiology**, v. 72, n. 2, p. 133–138, 2015.
- ANTUNES, F. A. F. et al. Hemicellulosic Ethanol Production by Immobilized Wild Brazilian Yeast *Scheffersomyces shehatae* UFMG-HM 52.2: Effects of Cell Concentration and Stirring Rate. **Current Microbiology**, v. 72, n. 2, p. 133–138, 1 fev. 2016.
- BASSO, L. C.; BASSO, T. O.; ROCHA, S. N. Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and Its Impact on Yeast Fermentation. Em: BERNARDES, M. A. S. (Ed.). **Biofuel Production-Recent Developments and Prospects**. [s.l.] Interchopen, 2011. p. 85–100.
- BASTOS, V. D. Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável : revolução tecnológica e financiamento. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)**, p. 85–138, dez. 2012.

- BEHERA, S.; MOHANTY, R. C.; RAY, R. C. Ethanol fermentation of sugarcane molasses by *Zymomonas mobilis* MTCC 92 immobilized in *Luffa cylindrica* L. sponge discs and ca-alginate matrices. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, n. 4, p. 1499–1507, 2012.
- BETTIGA, M.; HAHN-HÄGERDAL, B.; GORWA-GRAUSLUND, M. F. Comparing the xylose reductase/xylytol dehydrogenase and xylose isomerase pathways in arabinose and xylose fermenting *Saccharomyces cerevisiae* strains. **Biotechnology for Biofuels**, v. 1, p. 0–8, 2008.
- BIRON, M. **Material Selection for Thermoplastic Parts**. 1. ed. [s.l.] Matthew Deans, 2016.
- BONOMI, A. et al. **The Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) - 2011 Report**. Campinas: [s.n.].
- BRASIL. **Resolução N° 758 de 23 de novembro de 2018**. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei n° 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras. Brasília: Agência de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2018.
- BRASIL. **Resolução N°17 de 5 de outubro de 2021**. Define as metas compulsórias anuais de redução de emissão de gases causadores de efeito estufa para a comercialização de combustíveis. Brasília: Presidência da República, 2021.
- BRAT, D.; BOLES, E.; WIEDEMANN, B. Functional expression of a bacterial xylose isomerase in *Saccharomyces cerevisiae*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 75, n. 8, p. 2304–2311, 2009.
- BRITTO, W. Revolução nos canaviais - a reinvenção da cana mineira, com economia circular e sustentabilidade. **Revista Ecológico**, v. 130, p. 50–55, nov. 2020.
- CARPIO, R. R. **Otimização Do Processo De Produção De Etanol De Segunda Geração Em Um Sistema Integrado À Primeira Geração**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- CARVALHO, F. B. DE P. **Pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar por autohidrólise, com ênfase na reutilização de água**. Brasília: Universidade de Brasília, 2018.
- CCEE. **Painel de Preços**. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/web/guest/precos/painel-precos>>. Acesso em: 14 nov. 2021.
- CEPEA/ESALQ. **Indicador Mensal do Etanol Anidro Combustível**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/etanol-mensal-al.aspx>>. Acesso em: 9 set. 2021.
- CERQUEIRA-LEITE, R. C. DE et al. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v. 34, n. 5, p. 655–661, 2009.
- CHIEPPE JÚNIOR, J. B. **Tecnologia e Fabricação do Álcool**. Inhumas: [s.n.].
- CHRIS BURK, P. E. Techno-economic modeling for new technology development. **Chemical Engineering Progress**, v. 114, n. 1, p. 266–269, 2018.
- COMEXSTAT. **Exportação e Importação Geral**. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 9 out. 2022.

- CUNHA, J. T. et al. Xylose fermentation efficiency of industrial *Saccharomyces cerevisiae* yeast with separate or combined xylose reductase/xylytol dehydrogenase and xylose isomerase pathways. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1–14, 2019.
- DANTAS, G. DE A. **Alternativas de Investimento do Setor Sucroenergético Brasileiro para Aproveitamento de Bagaço e de Palha**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2013.
- DELLA-BIANCA, B. E. et al. What do we know about the yeast strains from the Brazilian fuel ethanol industry? **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 3, p. 979–991, 2013.
- DEMEKE, M. M. et al. Development of a D-xylose fermenting and inhibitor tolerant industrial *Saccharomyces cerevisiae* strain with high performance in lignocellulose hydrolysates using metabolic and evolutionary engineering. **Biotechnology for Biofuels**, v. 6, n. 1, p. 1–24, 2013.
- DIAS, M. O. S. et al. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 152–161, 2012.
- DIAS, M. O. S. et al. Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 8, p. 1411–1417, 2013.
- DIAS, M. O. S. et al. Integrated first and second generation ethanol production from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**, v. 37, p. 445–450, 2014.
- DOĞAN, A. et al. **Improvements of tolerance to stress conditions by genetic engineering in *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production**. **Applied biochemistry and biotechnology**, 1 set. 2014.
- DUARTE, L. C. et al. Yeast biomass production in brewery's spent grains hemicellulosic hydrolyzate. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 148, n. 1–3, p. 119–129, mar. 2008.
- DUTTA, K.; DAVEREY, A.; LIN, J. G. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation. **Renewable Energy**, v. 69, p. 114–122, 2014.
- ELIAS, A. M. **Contribuições da Engenharia de Sistemas em Bioprocessos à transição para a economia neutra em carbono: Análise tecno-econômica-ambiental de biorrefinarias**. Tese (Doutorado em Engenharia Química)—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- ELIAS, A. M. et al. Retro-techno-economic-environmental analysis improves the operation efficiency of 1G-2G bioethanol and bioelectricity facilities. **Applied Energy**, v. 282, 15 jan. 2021a.
- ELIAS, A. M. et al. Techno-Economic-Environmental Analysis of Sophorolipid Biosurfactant Production from Sugarcane Bagasse. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 27, p. 9833–9850, 14 jul. 2021b.
- ENSINAS, A. V. **Integração térmica e otimização termoeconômica aplicadas ao processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balço Energético Nacional - BEN 2021** Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>.

ESTEVES, E. M. M. **Análise do Ciclo de Vida do biodiesel de soja: o impacto do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (SILP)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

EWANICK, S.; BURA, R. Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass. Em: **Bioalcohol Production: Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass**. [s.l.] Elsevier Inc., 2010. p. 3–23.

FALEIRO, C. P.; CARVALHO, K. A. Implantação de sistema de beneficiamento de levedura residual para produção de ração animal. **Sistemas & Gestão**, v. 16, n. 1, p. 77–83, 4 maio 2021.

FERREIRA, A. D. **Produção eficiente de Etanol 2G a partir de hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar: otimizando condições de cultivo e operacionais**. Lorena: Universidade de São Paulo, 2016.

FILHO, G. Z.; PICCIRILLI, J. P. **O Processo de Fabricação do Açúcar e Álcool: Desde a Lavoura da Cana até o Produto Acabado**. 1ª ed. Santa Cruz do Rio Prado: Editora Viena, 2012.

FILIPOVIĆ, V. et al. Acceptability of bread supplemented with yeast extract to consumers. **Acta agriculturae Serbica**, v. 27, n. 53, p. 3–7, 2022.

FORBES AGRO. **Como nanocristais da palha de cana-de-açúcar podem ajudar a indústria petroquímica**. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2021/06/como-nanocristais-da-palha-de-cana-de-acucar-podem-ajudar-a-industria-petroquimica/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

FURLAN, F. F. et al. Process Alternatives for Second Generation Ethanol Production from Sugarcane Bagasse. Em: **Computer Aided Chemical Engineering**. [s.l.] Elsevier B.V., 2015. v. 37p. 1349–1354.

FURLAN, F. F. **Metodologia para guiar o desenvolvimento e implementação industrial de novas tecnologias unindo engenharia econômica e Engenharia de (bio)processos e sistemas: Aplicação à produção de etanol de segunda geração**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2016.

FURLAN, F. F. et al. Retro-Techno-Economic Analysis: Using (Bio)Process Systems Engineering Tools to Attain Process Target Values. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 37, p. 9865–9872, 2016.

FURTADO, J. M. DOS S. **Comparação de Métodos e Ferramentas de Análise de Impacto de Ciclo de Vida, aplicados a processos químicos alternativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial)—Lisboa: Universidade de Lisboa, 2014a.

FURTADO, J. M. DOS S. **Comparação de Métodos e Ferramentas de Análise de Impacto de Ciclo de Vida, aplicados a processos químicos alternativos**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2014b.

GAMA, P. **Por que gasolina tem 27% de etanol e postos querem reduzir percentual**. Disponível em: <<https://www.uol.com.br/carros/noticias/redacao/2021/09/12/por-que-27-da-gasolina-brasileira-e-composta-por-alcool.htm>>. Acesso em: 2 out. 2021.

GE, X. et al. Chapter 5 - Conversion of Lignocellulosic Biomass Into Platform Chemicals for Biobased Polyurethane Application. Em: **Advances in Bioenergy**. 1. ed. [s.l.] Elsevier Inc., 2018. v. 3p. 161–213.

GILPIN, G. S. **The environmental life cycle assessment of selected 1 st through 3 rd generation biofuels within the context of sustainable development**. Tese (Doutorado em Filosofia)—[s.l.] Norwegian University of Life Sciences, Faculty of Environmental Science and Technology, 2016.

GOEDKOOP, M. et al. **Introduction to LCA with SimaPro Colophon**. CaliforniaPRé, , 2016. Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/legacy/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>>

HAKOBYAN, L.; GABRIELIAN, L.; TRCHOUNIAN, A. Yeast extract as an effective nitrogen source stimulating cell growth and enhancing hydrogen photoproduction by *Rhodobacter sphaeroides* strains from mineral springs. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 8, p. 6519–6526, abr. 2012.

HARDING, K. **A Generic Approach to Environmental Assessment of Microbial Bioprocesses through Life Cycle Assessment (LCA)**. Tese (Doutorado em Filosofia)—Cape Town: University of Cape Town, dez. 2008.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer Nature, 2019. v. 64

HAZRA, M. K. et al. Sulfuric acid decomposition chemistry above Junge layer in Earth's atmosphere concerning ozone depletion and healing. **Communications Chemistry**, v. 2, n. 1, 1 dez. 2019.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering**. 3. ed. Nova Iorque: Elsevier Science Publishing Company, 1986.

IEA. **Potencial Contribution of Bioenergy to the World 's Future Energy: IEA BIOENERGY: EXCO: 2007:02**. [s.l.: s.n.].

IEA. **Global Energy & CO2 Status Report 2018**. [s.l.] IEA, 2019.

JACARÉ - VENTILADORES INDUSTRIAIS. **Limpeza de Cana a Seco por Ventilação**. Disponível em: <<http://www.jacare.ind.br/Limpeza-de-Cana-Seco-por-Ventilacao.php>>. Acesso em: 10 jun. 2021.

JAMBO, S. A. et al. A review on third generation bioethanol feedstock. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 756–769, 2016.

- JUNQUEIRA, T. L. et al. Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2017.
- KHANAL, S. K. et al. **Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass**. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010.
- LEE, M. et al. Metal Dependence of the Xylose Isomerase from *Piromyces* sp. E2 Explored by Activity Profiling and Protein Crystallography. **Biochemistry**, v. 56, n. 45, p. 5991–6005, 2017.
- LI, X. et al. Comparison of xylose fermentation by two high-performance engineered strains of *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology Reports**, v. 9, p. 53–56, 2016.
- LINDORFER, J. et al. **Technical, economic and environmental assessment of biorefinery concepts IEA Bioenergy task 42**. [s.l.: s.n.].
- LONGATI, A. A. **Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol**. Tese de Doutorado em Engenharia Química—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- LONGATI, A. A. et al. Defining research and development process targets through retro-techno-economic analysis: The sugarcane biorefinery case. **Bioresource Technology**, v. 263, n. February, p. 1–9, 2018a.
- LONGATI, A. A. et al. Defining research and development process targets through retro-techno-economic analysis: The sugarcane biorefinery case. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 1–9, 1 set. 2018b.
- LONGATI, A. 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.
- LORENCINI, P. **Otimização do pré-tratamento ácido de bagaço de cana para a sua utilização como substrato na produção biológica de hidrogênio**. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2013.
- MACEDO, I. DE C.; LEAL, M. R. L. V.; HASSUANI, S. J. **Sugar cane residues for power generation in the sugar/ethanol mills in Brazil**. **Energy for Sustainable Development** Elsevier, , 2001.
- MACRELLI, S.; GALBE, M.; WALLBERG, O. Effects of production and market factors on ethanol profitability for an integrated first and second generation ethanol plant using the whole sugarcane as feedstock. **Biotechnology for Biofuels**, v. 7, n. 1, p. 1–16, 2014.
- MACRELLI, S.; MOGENSEN, J.; ZACCHI, G. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. **Biotechnology for Biofuels**, v. 5, 2012.
- MAGA, D. et al. Comparative life cycle assessment of first- and second-generation ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 2, p. 266–280, 2019.

- MANOCHIO, C. Produção de Bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos. p. 33, 2014.
- MARCAL, L. M. et al. Fundamentos Da Análise Do Ciclo De Vida. **XXXIII Enegep**, p. 12, 2013.
- MARQUES, W. L. et al. Sucrose and *Saccharomyces cerevisiae*: A relationship most sweet. **FEMS Yeast Research**, v. 16, n. 1, p. 1–48, 2015.
- MEIJNEN, J. P. et al. Polygenic analysis and targeted improvement of the complex trait of high acetic acid tolerance in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9, n. 1, p. 1–18, 2016.
- MENA, I. **Verbete Draft: o que é Economia Circular**. Disponível em: <<https://www.projetodraft.com/verbete-draft-o-que-e-economia-circular/>>. Acesso em: 4 out. 2021.
- MERKLEIN, K.; FONG, S. S.; DENG, Y. Biomass Utilization. Em: ECKERT, C. A.; TRINH, C. T. (Eds.). **Biotechnology for Biofuel Production and Optimization**. 1. ed. [s.l.] Elsevier B.V., 2016. p. 291–324.
- MF MAGAZINE. **Saiba como o bagaço de cana pode substituir o petróleo na fabricação de plásticos**. Disponível em: <<https://blog.mfrural.com.br/bagaco-de-cana-na-fabricacao-de-plasticos/>>. Acesso em: 12 out. 2021.
- MILESSI, T. S. et al. Continuous 2G ethanol production from xylose in a fixed-bed reactor by native *Saccharomyces cerevisiae* strain through simultaneous isomerization and fermentation. **Cellulose**, v. 27, n. 8, p. 4429–4442, 2020a.
- MILESSI, T. S. et al. Repeated batches as a strategy for high 2G ethanol production from undetoxified hemicellulose hydrolysate using immobilized cells of recombinant *Saccharomyces cerevisiae* in a fixed-bed reactor. **Biotechnology for Biofuels**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2020b.
- MILESSI, T. S. DOS S. **Produção de Etanol 2G a partir de hemicelulose de bagaço de cana-de-açúcar utilizando *Saccharomyces cerevisiae* selvagem e geneticamente modificada imobilizadas**. Tese de Doutorado em Engenharia Química—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2017.
- MME(MISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA); EPE(EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - PDE 2030MME/EPE**. Brasília: [s.n.].
- MOONSAMY, T. A. et al. A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. **Industrial Crops and Products**, v. 188, 15 nov. 2022.
- MOSIER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 6, p. 673–686, 2005.
- NAKANISHI, S. C. et al. Fermentation strategy for second generation ethanol production from sugarcane bagasse hydrolyzate by *Spathaspora passalidarum* and *Scheffersomyces stipitis*. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 114, n. 10, p. 2211–2221, 2017.

- NASCIMENTO, R. F. et al. **Uso de bioadsorventes lignocelulósicos na remoção de poluentes de efluentes aquosos**. Fortaleza: Editora UFC, 2014. v. 01
- NIELSEN, F. et al. Sequential Targeting of Xylose and Glucose Conversion in Fed-Batch Simultaneous Saccharification and Co-fermentation of Steam-Pretreated Wheat Straw for Improved Xylose Conversion to Ethanol. **Bioenergy Research**, v. 10, n. 3, p. 800–810, 2017.
- OLIVEIRA, B. C. **Complexidade em biorrefinarias**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- OLIVEIRA, C. M. et al. Process integration of a multiperiod sugarcane biorefinery. **Applied Energy**, v. 213, p. 520–539, 1 mar. 2018.
- OLIVEIRA, F. B. DE. As disfunções sociais do Programa Nacional do Alcool em decorrência da excessiva ênfase na cana-de-açúcar. **Revista de Administração Pública**, v. 16, n. 3, p. 25–41, 1982.
- OLIVEIRA, R. M. M.; NUNES, M. T. A. S.; SOUSA, R. M. S. DE. Pré-Tratamento Químico E Caracterização Do Bagaço Da Cana: Uma Perspectiva Para Produção De Etanol a Partir De Resíduos Agroindustriais / Chemical Pre-Treatment and Characterization of Sugarcane Bagasse: a Perspective for Ethanol Production From Agroindus. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 87865–87879, 2020.
- PARRA-RAMÍREZ, D.; MARTINEZ, A.; CARDONA, C. A. Technical and economic potential evaluation of the strain *Escherichia coli* MS04 in the ethanol production from glucose and xylose. **Biochemical Engineering Journal**, v. 140, p. 123–129, 15 dez. 2018.
- PENSAMENTO VERDE. **Empresa no interior de SP produz papel a partir da palha de cana**. Disponível em: <<https://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/empresa-no-interior-de-sp-produz-papel-partir-da-palha-de-cana/?hilite=palha>>. Acesso em: 12 out. 2021.
- PEREIRA, S. C. et al. 2G ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. **Biotechnology for Biofuels**, v. 8, n. 1, p. 1–16, 2015.
- PEREZ, C. L. **PRODUÇÃO DE ETANOL 2G EM REATOR DE LEITO FIXO E POR BIOPROCESSAMENTO CONSOLIDADO UTILIZANDO LEVEDURAS RECOMBINANTES DE ÚLTIMA GERAÇÃO**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2021.
- PEREZ, C. L. et al. Towards a practical industrial 2G ethanol production process based on immobilized recombinant *S. cerevisiae*: Medium and strain selection for robust integrated fixed-bed reactor operation. **Renewable Energy**, v. 185, p. 363–375, fev. 2022.
- PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; WEST, R. E. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5th. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- PRATTO, B. et al. Experimental optimization and techno-economic analysis of bioethanol production by simultaneous saccharification and fermentation process using sugarcane straw. **Bioresource Technology**, v. 297, n. September 2019, p. 122494, 2020.

RAMOS, C. S. **Novos coquetéis enzimáticos podem reduzir os custos de produção de forma expressiva.** Disponível em: <<http://www.granbio.com.br/noticias/novo-impulso-ao-etanol-celulosico-no-pais/>>. Acesso em: 19 set. 2022.

REIS, V. R. et al. Characteristics of *Saccharomyces cerevisiae* yeasts exhibiting rough colonies and pseudohyphal morphology with respect to alcoholic fermentation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 44, n. 4, p. 1121–1131, 2013.

ROBAK, K.; BALCEREK, M. Review of second generation bioethanol production from residual biomass. **Food Technology and Biotechnology**, v. 56, n. 2, p. 174–187, 2018.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho a biorrefinaria. A usina de acucar como empreendimento industrial para a geracao de produtos bioquimicos e biocombustiveis. **Quimica Nova**, v. 34, n. 7, p. 1242–1254, 2011.

SAHA, S. et al. **Bio-plastics and biofuel: Is it the way in future development for end users?** [s.l.] Elsevier Inc., 2018.

SANTIAGO, L. **Avaliação dos impactos ambientais: as principais ferramentas.** Disponível em: <<https://blog.waycarbon.com/2016/02/ferramentas-impactos-ambientais/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

SANTOS, C.; TAVARES, F. **Nuseed e GranBio anunciam acordo de cooperação global de longo prazo para acelerar P&D de cana-energia e expansão global.** Disponível em: <<http://www.granbio.com.br/press-releases/nuseed-e-granbio-anunciam-acordo-de-cooperacao-global-de-longo-prazo-para-acelerar-pd-de-cana-energia-e-expansao-global/>>. Acesso em: 19 set. 2023.

SANTOS, C. V. M.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Aspectos para implantação de uma biorrefinaria como alternativa para melhorar a matriz energética. **Anais do IX Simpórtio de Engenharia de Produção de Sergipe**, p. 654–666, 2017.

SANTOS, D. D. S. DOS. **Produção de etanol de segunda geração por *Zymomonas mobilis* naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa lignocelulósica.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, jan. 2012.

SARANGI, P. K.; NANDA, S.; MOHANTY, P. **Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization.** [s.l.: s.n.].

SARKER, T. R. et al. Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. **Chemosphere**, v. 284, 1 dez. 2021.

SOARES, R. P. **EMSO Manual.** [s.l.] ALSOC, 2007.

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.

SOLO RICO AGROCIÊNCIAS. **Bagaço da cana-de-açúcar: como pode ser utilizado?** Disponível em: <<https://solorico.net.br/bagaco-da-cana-de-acucar-como-pode-ser-utilizado/>>. Acesso em: 12 out. 2021.

STEPHENS, E. et al. An economic and technical evaluation of microalgal biofuels. **Nature Biotechnology**, v. 28, n. 2, p. 126–128, 2010.

STROHM, B. Ethanol. **Encyclopedia of Toxicology: Third Edition**, v. 2, p. 488–491, 2014.

TURTON, R. et al. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes**. 4th. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2012.

UFSCAR (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA). **Modelagem e Simulação de Biorrefinarias de Produção de etanol 1G e 2G**. São Carlos: [s.n.].

VANMARCKE, G. et al. A novel AST2 mutation generated upon whole-genome transformation of *Saccharomyces cerevisiae* confers high tolerance to 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and other inhibitors. **PLOS Genetics**, v. 17, n. 10, p. 1–27, 2021.

VASCONCELOS, J. N. Ethanol Fermentation. Em: SANTOS, F.; CALDAS, C.; BORÉM, A. (Eds.). **Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol**. [s.l.: s.n.]. p. 311–340.

VERAS, H. C. T.; PARACHIN, N. S.; ALMEIDA, J. R. M. Comparative assessment of fermentative capacity of different xylose-consuming yeasts. **Microbial Cell Factories**, v. 16, n. 1, p. 1–8, 2017.

WALTER, A. et al. **A Sustainability Analysis of the Brazilian Ethanol Sustainable development potentials and pathways for biobased economy options: an integrated approach on land use, energy system and economy and environment**. View project. Campinas: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/265669516>>.

XIMENES, E. et al. Hydrothermal pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production. Em: **Hydrothermal Processing in Biorefineries: Production of Bioethanol and High Added-Value Compounds of Second and Third Generation Biomass**. [s.l.] Springer International Publishing, 2017. p. 181–205.

YANG, B.; TAO, L.; WYMAN, C. E. **Strengths, challenges, and opportunities for hydrothermal pretreatment in lignocellulosic biorefineries**. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining** John Wiley and Sons Ltd, , 1 jan. 2018.

YANG, S. T.; LIU, X.; ZHANG, Y. Metabolic Engineering-Applications, Methods, and Challenges. Em: YANG, S. T. (Ed.). **Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources**. [s.l.] Elsevier B.V., 2007. p. 73–118.

ZABED, H. et al. Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: An overview on feedstocks and technological approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 751–774, 2016.

ZAREI, O.; DASTMALCHI, S.; HAMZEH-MIVEHROUD, M. **A Simple and Rapid Protocol for Producing Yeast Extract from *Saccharomyces cerevisiae* Suitable for Preparing Bacterial Culture Media** Shaheed Beheshti University of Medical Sciences and Health Services Iranian Journal of Pharmaceutical Research. [s.l.: s.n.].

ZHANG, K. et al. Removal of the fermentation inhibitor, furfural, using activated carbon in cellulosic-ethanol production. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 24, p. 14055–14060, 21 dez. 2011.

ZHAO, Z. et al. Biochemical routes for uptake and conversion of xylose by microorganisms. **Biotechnology for Biofuels**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2020.

ZIMMERMANN, A. W. et al. Techno-Economic Assessment Guidelines for CO₂ Utilization. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, n. January, p. 1–23, 2020.

ZIOLKOWSKA, J. R. Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies. Em: REN, J. et al. (Eds.). **Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making**. [s.l.] Elsevier Inc., 2020. p. 1–19.

APÊNDICE

ANÁLISE ECONÔMICA

Antes de uma planta entrar em operação, segundo Peter; Timmerhaus; West (2003), uma grande quantidade de dinheiro deve ser investida em máquinas, equipamentos, instalações, terreno, tubulações, entre outros itens. Além disso, faz-se necessário um fundo para cobrir as despesas oriundas da operação da planta antes das primeiras receitas ficarem disponíveis.

O capital necessário para suprir os custos com manufatura e as utilidades da planta industrial é denominado capital fixo. O capital necessário para a operação da planta é chamado de capital de giro, que corresponde a quantidade total de dinheiro investida em matéria-prima e suprimentos transportados a planta, produtos finalizados ou em processo de finalização na planta, contas a receber, dinheiro para pagamento mensal (salários, compra de matéria-prima). O custo total de investimento representa a soma do capital fixo e o capital de giro. O capital fixo, é dividido entre os custos diretos e indiretos. Os custos diretos representam o capital necessário pelo completo funcionamento do processo, como instrumentos, tubulações, fundações. Os custos indiretos consistem nas despesas gerais de construção, entre outros componentes da planta que não estão relacionados diretamente com a operação do processo, como o terreno, prédios administrativos, laboratórios, gerenciamento de resíduos, sendo uma parte permanente da planta (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003).

A modelagem técnico-econômica dos processos avaliados foi realizada com base em Peters; Timmerhaus; West (2003) e Turton et al. (2012). Na estimativa do custo capital de investimento, o CAPEX, todos os equipamentos foram listados e separados de acordo com as etapas exibidas nos fluxogramas dos Cenários I, II e III (item 4.3.3.1, 4.3.3.2 e 4.3.3.3). Para obter o custo de aquisição de cada equipamento de forma mais precisa, é necessário a cotação desses equipamentos fornecida por um fornecedor (um vendedor de equipamentos). Outra forma de estimar o valor de um equipamento é utilizar dados de uma planta similar com

capacidade diferente, onde os dados de custo serão ajustados em relação a diferença de capacidade, pela Equação a.1, e em relação ao tempo para atualizar os custos do equipamento, pela Equação a.2.

$$Ca = Cb \left(\frac{Aa}{Ab} \right)^n \quad (a. 1)$$

Onde Ca é o custo de aquisição do equipamento desejado, Aa é fator relacionado à dimensão do equipamento que se deseja saber o custo, Ab é fator relacionado a dimensão do equipamento base, n é o expoente de custo, Cb é referente ao custo de equipamento conhecido (TURTON et al., 2012).

$$C_2 = C_1 \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad (a. 2)$$

Onde C_2 é o custo de aquisição do equipamento desejado, I_2 é o índice de custo no presente, I_1 é o índice de custo na data do custo original/base, C_1 é o custo de aquisição do equipamento original/base. O índice utilizado para atualizar o custo capital para a construção de uma biorrefinaria foi o CEPCI (*Chemical Plant Cost Indexes*).

Dessa forma, após a obtenção de todos os equipamentos, são calculados os demais custos de capital da unidade industrial que compõem o CAPEX. Com o custo dos equipamentos, suas instalações e tubulações, etc. é obtido o valor de custo direto total da planta (TPDC). O custo total da planta (TPC) é composto pelo TPDC, custo do terreno e custo total indireto da planta (TPIC). Sendo o custo do terreno 15% do custo fixo direto (DFC). O custo total indireto (TPIC) é mensurado através dos custos de engenharia e construção, que representam respectivamente 17,5% do TPDC e 15% do custo direto fixo (DFC). O valor do custo direto fixo (DFC) é o resultado da soma do TPC com os custos de contingência e empreiteira, ou seja, todos os custos diretos e indiretos de capital da planta. Os custos de contingência e empreiteira representam 10% do DFC. Assim, o valor do CAPEX é encontrado através do somatório do DFC com o capital de giro (WS) e o capital para a inicialização da planta (SC), onde o capital de giro corresponde a 15% do valor do CAPEX, e o capital de inicialização da planta corresponde a 5% do DFC.

Os custos operacionais (CO) são todas as despesas que estão atreladas a produção ou com os equipamentos físicos do processo. Segundo Peter; Timmerhaus; West (2003), o custo operacional é dividido entre os custos de produção variáveis, encargos fixos e custos indiretos

da planta. Os custos variáveis correspondem as despesas com matéria-prima, mão de obra, utilidades, manutenção e reparos, entre outros elementos que só ocorrem durante a operação da planta. As matérias-primas e as utilidades são mensuradas de acordo com o balanço de massa e energia da biorrefinaria. Os custos com manutenção e reparos correspondem a 2% do custo dos equipamentos. A mão de obra corresponde a 10% do custo total do produto. A supervisão operacional e assistência administrativa são mensuradas através da quantidade de mão de obra necessária, correspondendo a 10% respectivamente. Os custos com suprimentos, como: ferramentas, dispositivos de proteção, entre outros são 10% da manutenção. Os encargos laboratoriais responsáveis pelos custos com ensaios laboratoriais para controle de operações e controle de qualidade são estimados em 10% da mão de obra. Os custos de patentes ou royalties são os pagamentos para obter direito de produzir, usar, explorar ou comercializar um bem, representando 1% do custo total do produto.

Os encargos fixos são os custos não afetados pelo volume total de produção ou de vendas do processo, são classificados em depreciação, taxas de propriedade, seguros, financiamentos e aluguéis. A depreciação é calculada separadamente por variar de ano para ano e do método utilizado, sendo 10% dos custos diretos fixos (DFC). A taxa de propriedade e seguro correspondem a 1% do DFC.

Os custos indiretos são as despesas necessárias para os serviços de rotina da planta, mas não está relacionada diretamente ao processo (não varia amplamente com mudanças na taxa de produção), são os serviços médicos e hospitalares, os serviços de segurança, os planos de saúde, entre outros benefícios para o funcionário, representando 50% dos custos com mão de obra, supervisão e manutenção (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003).

As despesas gerais (DG) da planta são outros custos envolvidos nas operações da planta, além dos custos de operação/manufatura, sendo divididas em custos administrativos, custos de distribuição e marketing e custos de pesquisa e desenvolvimento (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003). Ao todo, representam 20% dos custos com mão de obra, supervisão e manutenção.

Os custos operacionais (CO) são os custos deduzidos da receita, resultando na receita operacional. A Receita consiste na venda dos produtos da biorrefinaria, representando a quantidade de produto gerada por hora multiplicada pelo seu preço e o tempo de operação no

ano em horas. O fluxo de caixa (FC) consiste no saldo disponível na empresa, para atender às despesas operacionais atuais (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003).

Para o cálculo do fluxo de caixa, as seguintes equações foram utilizadas, sendo considerado que nos primeiros dois anos da planta representam o período de instalação e implementação da biorrefinaria, o terceiro ano representa o início das operações na unidade industrial, onde a biorrefinaria operará até o último ano de operação (25 anos depois).

$$FC[1:2] = -\frac{DFC}{2} \quad (a.3)$$

$$FC[3] = -WC - SC \quad (a.4)$$

$$FC[4:13] = Receita - CO - DG - Taxa(1) \quad (a.5)$$

$$FC[14:27] = Receita - CO - DG - Taxa(2) \quad (a.6)$$

$$FC[28] = Receita - CO - DG - Taxa(3) + WC \quad (a.7)$$

As taxas são quantias em termos presentes descontadas em um valor futuro, que auxiliam a calcular o fluxo de caixa em determinados períodos de tempo. As taxas representam 34% da receita gerada ao ano.