

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Leonardo Leitner de Magalhães

PROJETO DE UMA USINA DE ETANOL DE 2^a
GERAÇÃO

SÃO CARLOS -SP
2022

PROJETO DE UMA USINA DE ETANOL DE 2ª GERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos,
para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo
Silva Queiroz

São Carlos-SP
2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 12 de setembro de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: João Paulo Silva Queiroz, DEQ/UFSCar

Convidado: Gustavo Dias Maia, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTO

Primeiramente, queria agradecer aos professores do DEQ UFSCAR por todos os ensinamentos que me trouxeram e banca examinadora por me auxiliar nesse momento tão importante da vida.

A todos os meus colegas e amigos da graduação, que me receberam de braços abertos quando me mudei para São Carlos. Principalmente, aos meus amigos da AEQ, CAEQ e Operação Natal, que me ensinaram tantas coisas diferentes, por estarem lá por mim quando mais precisei e por me proporcionarem alguns dos momentos mais felizes da minha vida.

Por fim, gostaria de agradecer a minhas irmãs e minha cachorrinha Mel, que infelizmente veio a falecer enquanto trabalhava nesse projeto. Muito obrigado por estar ao meu lado durante esses últimos 14 anos e ser meu suporte emocional quando eu mais precisava.

RESUMO

Com as atuais preocupações ambientais ao redor do mundo, os estudos relacionados à produção de biocombustíveis vêm ganhando cada vez mais espaço. O etanol é um biocombustível com grande potencial de crescimento, já que seu uso em substituição à gasolina ocorre a muitos anos no Brasil. Neste contexto, destacam-se estudos que visam aumentar a produção do etanol por meio do aproveitamento dos resíduos do processo de produção convencional. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar e projetar uma usina produtora de etanol de segunda geração por meio do bagaço da cana de açúcar. Para realização do projeto, foram estudados os aspectos comerciais, econômicos e de engenharia relacionados ao processo, através de dados disponíveis na literatura. Por fim, desenvolveu-se um anteprojeto para uma usina de etanol de segunda geração, utilizando o bagaço de cana de açúcar como matéria prima, viável economicamente com um tempo de retorno de 7 anos para uma capacidade de processamento de 476 ton/dia de bagaço.

Palavras-chave: Etanol de segunda geração. Bagaço de cana de açúcar. Viabilidade econômica. Biocombustível.

ABSTRACT

With today's worries about the world environmental situation, studies connected to the production of biofuels are gaining momentum. Ethanol is a biofuel with great potential, since its use as a gasoline alternative has been around for many years in Brazil. Within this context, studies that aim to increase the production of ethanol through the use of waste from the conventional production stand out. Thus, the objective of this work was to study and design a second-generation ethanol production plant using sugarcane bagasse. To carry out the project, the commercial, economic and engineering aspects related to the process were studied through data available in the literature. Finally, a preliminary project for a second generation ethanol plant using sugarcane bagasse as raw material was developed. The plant was economically viable with a payback time of 7 years for a processing capacity of 476 ton/day of bagasse.

Palavras-chave: Second-generation ethanol. Sugarcane bagasse. Economic viability. Biofuels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de pedaço do polímero de celulose.	15
Figura 2 - Esquema de uma das possíveis formações da hemicelulose.	15
Figura 3 - Esquema de uma das possíveis formações da lignina.	16
Figura 4 - Esquema da quebra das fibras pelas etapas de pré-tratamento.	18
Figura 5 - Esquema de geração de inibidores pela degradação dos diferentes componentes da biomassa lignocelulósica.	19
Figura 6 - Mecanismo de hidrólise ácida das ligações glicosídicas da glicose.	24
Figura 7 - Esquema da hidrólise enzimática da celulose em glicose.	25
Figura 8 - Mecanismo de hidrólise enzimática da hemicelulose em xilose.	26
Figura 9 - Fluxograma simplificado do processo.	29
Figura 10 - Fluxograma do processo.	37
Figura 11 - Fluxo de Caixa Acumulado.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição de diferentes biomassas lignocelulósicas.	17
Tabela 3.1 - Fator de Lang para cada tipo de planta.	32
Tabela 3.2 - Custo unitário de cada matéria-prima.	35
Tabela 3.3 - Custo unitário de cada utilidade.	36
Tabela 4.1 - Composições das correntes da explosão a vapor.	38
Tabela 4.2 - Composições das correntes de filtração.	38
Tabela 4.3 - Composições das correntes de hidrólise.	39
Tabela 4.4 - Composições das correntes de filtração.	40
Tabela 4.5 - Composições das correntes de fermentação da xilose.	41
Tabela 4.6 - Composições das correntes de fermentação da glicose.	41
Tabela 4.7 - Composições das correntes de centrifugação da levedura <i>Scheffersomyces stipitis</i> .	42
Tabela 4.8 - Composições das correntes de centrifugação da levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	42
Tabela 4.9 - Composições das correntes de destilação.	43
Tabela 4.10 - Principais equipamentos e seus custos.	44
Tabela 4.11 - Custos de operação.	44
Tabela 4.12 - Receitas geradas.	45
Tabela 4.13 - EBITDA anual.	45
Tabela 4.14 - Valores de VPL, TIR e payback.	46

LISTA DE SIGLAS E NOMES

EPE - Empresa de Pesquisa Energética.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

ANP - Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

EMPRABA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

MME - Ministério de Minas e Energia.

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

E2G - Etanol de Segunda Geração.

E1G - Etanol de Primeira Geração.

VPL - Valor Presente Líquido.

TIR - Taxa Interna de Retorno.

TMAR - Taxa Mínima Atrativa de Retorno.

EBITDA - Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização.

CEPCI - Chemical Engineering Plant Cost Index.

CBio - Créditos de Descarbonização.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Etanol.....	11
2.2 Etanol de primeira geração.....	12
2.3 Etanol de segunda geração.....	13
2.4 Matéria prima	14
2.4.1 Celulose.....	14
2.4.2 Hemicelulose	15
2.4.3 Lignina	16
2.4.4 Biomassas lignocelulósicas.....	16
2.5 Pré-tratamento da biomassa.....	18
2.5.1 Pré-tratamentos físicos	19
2.5.2 Pré-tratamentos químicos	20
2.5.3 Pré-tratamentos biológicos.....	21
2.5.4 Pré-tratamentos combinados	22
2.6 Hidrólise	23
2.6.1 Hidrólise ácida	23
2.6.2 Hidrólise enzimática	25
2.7 Fermentação	26
2.8 Destilação.....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Capacidade de produção.....	28
3.2 Escolha do processo	29
3.3 Balanços de massa e energia.....	30
3.4 Avaliação econômica.....	30
3.4.1 Índices financeiros	30
3.4.2 Investimento de capital fixo	32
3.4.3 Custo de operação.....	33
3.4.4 Receita anual	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 Fluxograma do processo	37
4.2 Avaliação econômica.....	43
5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
6 REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços das questões climáticas globais, criou-se a necessidade de os países reverem suas matrizes energéticas e procurarem fontes de energia sustentáveis. Dentre essas fontes, o etanol se destaca como uma das mais utilizadas e eficientes, sendo que a sua utilização no lugar da gasolina comum chega a reduzir a emissão de CO₂ em até 73% (EMBRAPA, 2009). Além disso, apenas no Brasil, são produzidos mais de 30,3 bilhões de litros de etanol ao ano (CONAB, 2022).

A demanda por etanol continua a aumentar ao longo dos anos e o processo possui uma grande geração de resíduos. Apenas na safra 2021/22, estima-se que foram geradas 146 milhões de toneladas de bagaço de cana no Brasil (CONAB, 2022). Assim, o etanol de segunda geração (E2G) se torna um investimento interessante para aproveitamento dos resíduos, para o aumento da produção de etanol e para redução na emissão de gases estufa. Estima-se que o etanol de segunda geração tem o potencial de aumentar a produção de etanol em 50% sem aumentos nas áreas de plantio de cana (LORENZI, 2019).

Mesmo sendo um processo com grande potencial no país, devido à alta geração de bagaço de cana anualmente, o Brasil possui apenas uma planta em escala comercial de etanol de segunda geração (EPE 2021). Isso se deve principalmente pela ideia popular de que o processo ainda é economicamente inviável e que o bagaço residual é melhor destinado na queima e geração de energia.

Assim, esse trabalho tem como objetivo estudar os diferentes aspectos da produção de etanol de segunda geração e propor um anteprojeto de usina, com a finalidade de estudar a viabilidade e sensibilidades do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Etanol

O Etanol é um dos produtos orgânicos mais produzidos no mundo, sendo utilizado em diferentes produtos e processos. Ele é majoritariamente produzido pela fermentação de açúcares, sendo comercializado nas formas de etanol anidro (teor

de água de até 0,7% em massa) ou etanol hidratado (teor de água de até 7,5% em massa) (ANP, 2015). O etanol anidro é comumente utilizado em solventes orgânicos, em aerossóis, como intermediário na síntese de outras substâncias e como combustível misturado à gasolina, já o etanol hidratado é comumente utilizado em bebidas alcoólicas, cosméticos, medicamentos, produtos de limpeza, fabricação de plásticos e como combustível (CETESB, 2012).

Dentre seus usos, destaca-se o seu como biocombustível em motores Ciclo Otto em substituição à gasolina e outros combustíveis fósseis (ANP, 2020). Estima-se que veículos movidos a etanol reduzem a emissão de CO₂ em até 73%, comparando com os movidos a gasolina comum (EMBRAPA, 2009).

O Brasil é pioneiro na utilização de etanol combustível desde a década de 1970, quando ocorreu a primeira crise do petróleo. No ano de 1975, com o objetivo de combater o aumento do preço do petróleo e incentivar a produção e utilização do etanol nacional, criou-se o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) (FAPESP, 2016). Com as recentes preocupações com o meio ambiente e visando expandir cada vez mais o uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o programa RenovaBio em 2016 (EPE, 2017). Atualmente, o Brasil destaca-se como um dos maiores consumidores e o segundo maior produtor de etanol do mundo (ANP, 2020).

2.2 Etanol de primeira geração

O etanol de primeira geração (E1G) é produzido pela fermentação dos açúcares presentes na biomassa. As matérias primas utilizadas no processo de primeira geração podem ser classificadas pela fonte de açúcar sendo elas, sacarose (cana de açúcar, beterraba, sorgo sacarino etc.) ou amido (trigo, soja, mandioca etc.) (MUKTHAM, 2016).

O processo possui variações dependendo da matéria prima de escolha, mas pode-se resumir-lo pelas etapas de obtenção e tratamento da mistura de açúcares, fermentação dos açúcares por um microrganismo para produção de etanol e destilação do vinho para separação do produto (DEMIRBAS, 2007).

No Brasil, a cana de açúcar é a mais utilizada na indústria sucroalcooleira, sendo utilizada tanto para produção de etanol quanto açúcar. O país se destaca

como o maior produtor de cana de açúcar do mundo, atingindo uma produção de 585 milhões de toneladas de cana e 30,3 bilhões de litros de etanol produzidos a partir da cana de açúcar na safra 2021/22 (CONAB, 2022).

O processo de produção de etanol de primeira geração a partir da cana de açúcar consiste nas etapas de lavagem, moagem, tratamento do caldo, fermentação, destilação e desidratação. Durante a lavagem, a cana de açúcar passa por uma esteira rolante e é submetida a uma lavagem com água para retirada de material sólido. Ela posteriormente é cortada e encaminhada para uma série de imãs para retirada de metais que possam danificar as moendas (NOVACANA, 2022).

Na moagem, a cana passa por uma sequência de moendas em série para retirada do caldo. Para melhor extração do caldo, o sistema de moagem é composto por 4 a 7 moendas e uma corrente de água de embebição. Nessa etapa, a tonelada de cana gera cerca de 240 a 280kg de bagaço e o restante em caldo. Após a moagem, parte do bagaço é utilizado nas caldeiras para fornecer vapor à usina e o caldo passa por uma série de tratamentos físico-químicos e encaminhado para as dornas de fermentação. Na fermentação, os açúcares presentes no caldo são metabolizados pelas leveduras e transformados em etanol e gás carbônico (NOVACANA, 2022).

Por fim, o vinho fermentado saído das dornas é encaminhado para a destilaria, onde o etanol é separado da mistura. O processo gera como condensado o etanol hidratado e resíduo de fundo a vinhaça. O etanol hidratado posteriormente passa por um processo de desidratação para geração de etanol anidro (NOVACANA, 2022).

2.3 Etanol de segunda geração

O etanol de segunda geração é produzido pela fermentação dos açúcares presentes em resíduos lignocelulósicos. O processo é similar ao de primeira geração, com a adição das etapas para obtenção dos açúcares a serem fermentados nas dornas (MARTINS, 2018). Ele consiste nas etapas de pré-tratamento da biomassa, hidrólise do material lignocelulósico para liberação dos açúcares, fermentação dos açúcares para produção de etanol e destilação do vinho

para separação do produto (MUKTHAM, 2016).

O pré-tratamento da biomassa é a etapa em que diferentes processos são realizados para garantir maior acessibilidade dos carboidratos estruturais para as próximas etapas (MUKTHAM 2016). Essa etapa se destaca como uma das mais importantes do processo, estima-se que um processo de hidrólise com pré-tratamento da biomassa tem seu rendimento aumentado de 20% para 90% (NASCIMENTO, 2011).

A hidrólise é a etapa em que os açúcares são liberados dos materiais lignocelulósicos para serem fermentados. O processo de quebra dos carboidratos poliméricos em monossacarídeos pode ocorrer pela ação de ácidos ou enzimas (NASCIMENTO, 2011).

A etapa de fermentação é similar à do processo de primeira geração, a diferença se daria na escolha de um microrganismo vantajoso para o processo de segunda geração. A etapa de destilação também é similar à do processo de primeira geração, normalmente sendo realizada junto com a destilação do E1G em usinas integradas (MARTINS, 2018).

A viabilidade econômica do processo de produção de etanol de segunda geração depende principalmente da matéria prima escolhida e dos processos de pré-tratamento e hidrólise da biomassa antes da fermentação (MUKTHAM, 2016).

2.4 Matéria prima

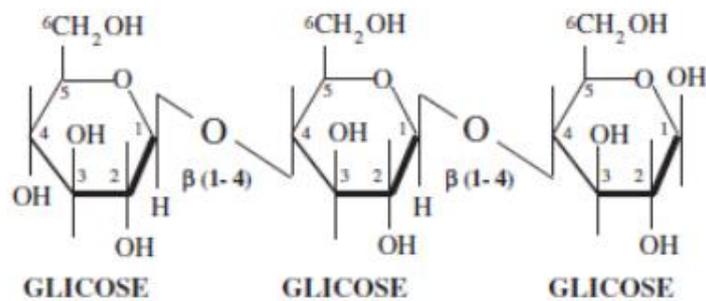
Os materiais lignocelulósicos são definidos como a fração biodegradável de produtos e resíduos da agricultura, silvicultura e indústrias relacionadas. Eles são compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, sendo que suas composições variam com a matéria prima (restolho, palha de arroz, casaca de frutos, madeira, bagaço de cana etc.) (MUKTHAM, 2016).

2.4.1 Celulose

A celulose é o principal componente da parede celular vegetal. Ela é um polímero de único monômero (D-glicose) de cadeia linear, contendo milhares de ligações β -1,4 glicosídicas. Sua estrutura é organizada e cristalina, devido as ligações de hidrogênio entre os polímeros, garantindo resistência e compactação à

molécula. A celulose é o composto orgânico mais comum na terra, compondo 30% de toda biomassa vegetal (SPYRIDON, 2016). A figura 1 mostra a estrutura da celulose.

Figura 1 – Esquema de pedaço do polímero de celulose.

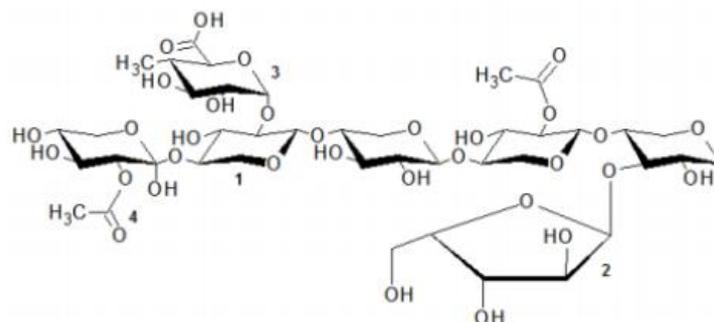


Fonte: Adaptado Martins 2018.

2.4.2 Hemicelulose

As hemiceluloses são outro componente essencial para parede celular vegetal. Elas são polímeros com estruturas variadas, contendo hexoses (glicose, galactose e manose), pentoses (xilose e arabinose) e ácidos urônicos (glicourônico, galactourônico, metilglicourônico), sendo a xilose o seu principal componente, compondo 90% da molécula. A hemicelulose possui uma estrutura aleatória, podendo ser linear ou ramificada e amorfa, tendo baixa resistência e maior reatividade que a celulose (SPYRIDON, 2016). A figura 2 mostra uma das possíveis composições da hemicelulose.

Figura 2 – Esquema de uma das possíveis formações da hemicelulose.

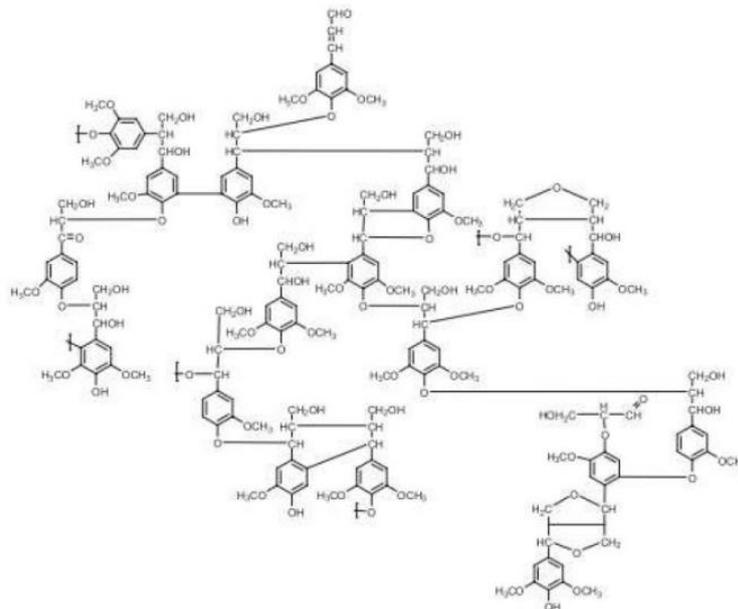


Fonte: Adaptado Martins 2018.

2.4.3 Lignina

A lignina é um composto que traz grande resistência, rigidez e impermeabilidade para parede celular. Ela é um polímero complexo composto pela polimerização de álcoois cumarílicos, coniferílicos e sinapílicos, sendo que a composição de cada varia de acordo com a fonte vegetal. A lignina é o componente principal de madeiras (de 30% a 60% em massa), mas em resíduos agrícolas, consiste em cerca de 3% a 15% em massa. Devido à falta de açúcares simples em sua composição, a lignina não contribui para fermentação alcoólica (SPYRIDON, 2016). A figura 3 mostra umas das possíveis formações da lignina.

Figura 3 – Esquema de uma das possíveis formações da lignina.



Fonte: Adaptado Martins 2018.

2.4.4 Biomassas lignocelulósicas

Composição química, disponibilidade, custo e transporte da biomassa são fatores importantes que afetam a escolha da matéria prima para produção de etanol. Os materiais lignocelulósicos são o recurso mais abundante da terra, além de apresentarem baixo custo e não competirem com as áreas de plantio para alimentos (MARTINS, 2018). Porém, eles apresentam desafios no processo de conversão, sua estrutura complexa e resistente dificulta a eficiência dos processos de hidrólise e

liberação dos açúcares fermentescíveis. Além disso, as porções de celulose e hemicelulose desejadas variam com a biomassa escolhida (MUKTHAM, 2016). A tabela 2.1 apresenta a composição de diferentes biomassas lignocelulósicas.

Tabela 2.1. – Composição de diferentes biomassas lignocelulósicas.

	% em massa seca		
	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Espiga de milho	45	35	15
Palha de milho	35 - 40	21 - 25	11 - 19
Gramíneas	25 - 40	35 - 50	10 - 30
Madeiras duras	40 - 50	24 - 40	18 - 25
Cascas de nozes	25 - 30	25 - 30	30 - 40
Palha de arroz	29 - 35	23 - 26	17 - 19
Madeiras molhes	45 - 50	25 - 35	25 - 35
Bagaço de cana de açúcar	25 - 45	28 - 32	15 - 25
Palha de trigo	33 - 40	20 - 25	15 - 20

Fonte: Adaptado Muktham 2016.

O bagaço da cana de açúcar é um subproduto da produção de etanol de primeira geração, formado nas moendas durante a etapa de extração do caldo. No Brasil, ele se destaca como potencial fonte lignocelulósica para a produção de E2G, principalmente pela sua alta porcentagem de celulose e hemicelulose e sua alta disponibilidade no país (NASCIMENTO, 2011). Na safra 2021/22, estima-se que foram geradas 146 milhões de toneladas de bagaço de cana no Brasil (CONAB, 2022).

Atualmente, o bagaço da cana de açúcar é utilizado em sistemas de cogeração, em que ele é incinerado na caldeira para garantir a autossuficiência de vapor e energia da usina (DIAS, 2011), na produção de pellets, que são comercializados e usados como fonte de energia (HOFFELDER, 2011), em alimentação de animais ou na produção de papéis (NASCIMENTO, 2011).

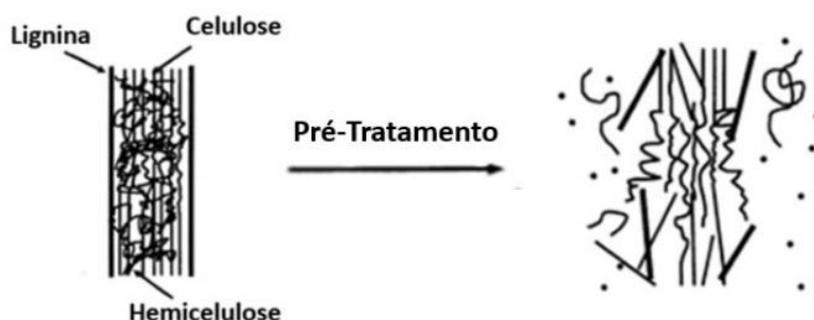
Estima-se que o E2G de bagaço de cana tem o potencial de aumentar a produção de etanol em 50% sem aumentos nas áreas de plantio de cana (LORENZI, 2019). Além disso, apresenta a vantagem de ser produzido no período entressafras, garantindo uma produção de etanol constante ao longo do ano (NASCIMENTO, 2011). No Brasil, existe uma única planta em escala comercial de

E2G a partir do bagaço de cana, a usina Costa Pinto da Raízen em Piracicaba, produzindo cerca de 20 milhões de litros no ano de 2019 (EPE 2021). A empresa já anunciou a construção de novas três plantas para 2024, planejando atingir uma capacidade de 280 milhões de litros ao ano, indicando um aumento considerável no setor para os próximos anos (RAÍZEN 2022).

2.5 Pré-tratamento da biomassa

O início do processo se dá no pré-tratamento da biomassa lignocelulósica. Seu objetivo é separar e aumentar a acessibilidade à celulose e hemicelulose presentes, removendo a lignina, diminuindo a cristalinidade da celulose e aumentando a porosidade da biomassa (MUKTHAM, 2016). A estrutura criada pela associação destes três constituintes torna as fibras vegetais resistentes a ações químicas e biológicas, o que dificulta as etapas de hidrólise e fermentação. A etapa de pré-tratamento é vital para a viabilidade da produção, um processo de hidrólise com pré-tratamento da biomassa tem seu rendimento aumentado de 20% para 90% (NASCIMENTO, 2011). A figura 4 mostra o esquema da quebra das fibras vegetais pelo pré-tratamento.

Figura 4 – Esquema da quebra das fibras pelas etapas de pré-tratamento.

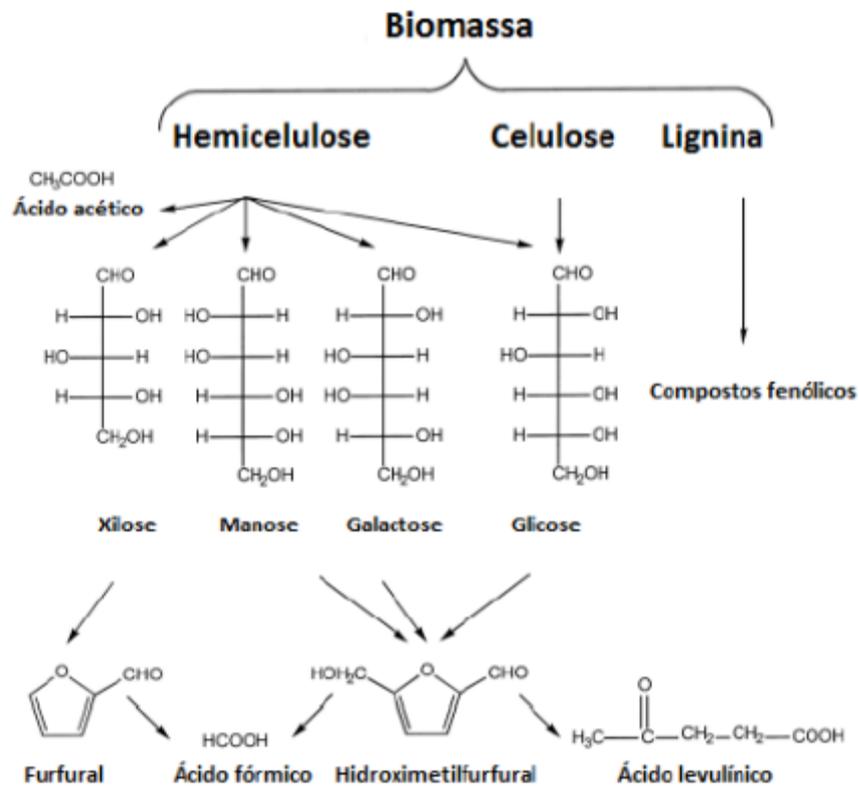


Fonte: Adaptado Martins 2018.

Um pré-tratamento eficiente deve aumentar a acessibilidade aos compostos de interesse e ser economicamente viável, evitando a degradação de carboidratos e produção de inibidores (MARTINS, 2018). A degradação dos componentes pode provocar a liberação de compostos fenólicos, furanos, ácidos fracos e compostos

inorgânicos que podem prejudicar as etapas seguintes, como ilustrado na figura 5 (SPYRIDON, 2016).

Figura 5 – Esquema de geração de inibidores pela degradação dos diferentes componentes da biomassa lignocelulósica.



Fonte: Adaptado Martins 2018.

O pré-tratamento é uma das etapas mais custosas do processo, diversos métodos foram estudados e suas eficiências variam com o processo e o tipo de biomassa a ser tratada. Eles podem ser classificados em pré-tratamentos físicos, biológicos, químicos ou combinados (NASCIMENTO, 2011).

2.5.1 Pré-tratamentos físicos

Os pré-tratamentos físicos são os que utilizando de energia para quebrar as longas cadeias moleculares dos componentes, diminuindo seu grau de polimerização, reduzir o tamanho das partículas, aumentando sua área superficial acessível e o tamanho dos poros, e reduzir a cristalinidade da celulose (ROLDÁN, 2014).

O pré-tratamento por moagem e trituração utiliza da energia mecânica e moendas para redução das partículas, os mais comuns são o de bolas, dois rolos, martelo ou facas. Sua vantagem é que ele não gera inibidores e não necessita de produtos químicos. Suas desvantagens são a alta demanda energética e a não remoção de lignina no processo (ROLDÁN, 2014).

2.5.2 Pré-tratamentos químicos

Os pré-tratamentos químicos são os que usam diferentes compostos para modificar a estrutura e composição química da parede celular, aumentando o acesso aos componentes de interesse e o rendimento da hidrólise (NASCIMENTO, 2011).

2.5.2.1 Bases

O pré-tratamento com bases consiste em tratar a biomassa com soluções básicas para remoção da lignina e aumento da reatividade do material. O processo opera a baixas temperaturas próximas de 25 a 55°C e pressões, mas com grandes tempos de residência (múltiplas horas ou até dias). Sendo as bases mais utilizadas o hidróxido de sódio, de potássio, de cálcio e de amônio (MUKTHAM, 2016).

A solução básica atua na ruptura das ligações aril-éter da lignina e das interações intermoleculares entre a lignina e a hemicelulose, removendo a lignina da estrutura e aumentando a acessibilidade à celulose e hemicelulose. Além disso, ela causa o inchaço da celulose, aumentando sua superfície interna e diminuindo o grau de polimerização e cristalinidade (NASCIMENTO, 2011).

Esse processo possui como vantagens as condições de operação amenas, a boa remoção da lignina, a baixa degradação dos açúcares e a baixa geração de inibidores. Porém suas desvantagens são a menor eficiência para biomassas com baixa concentração de lignina e os altos tempos de operação (ROLDÁN, 2014).

2.5.2.2 Ácidos

O pré-tratamento com ácido consiste em tratar a biomassa com uma solução de ácido diluído para degradar a hemicelulose e aumentar a acessibilidade da celulose. O material é submetido a uma solução ácida com concentração

aproximada de 4% (em massa) e temperaturas de 140 a 200°C por cerca de 1 hora. O ácido hidrolisa as cadeias poliméricas da hemicelulose, liberando os açúcares e outros componentes como furfural e hidroximetilfurfural (NASCIMENTO, 2011).

Após o tratamento, obtém-se uma solução hidrolisada com açúcares simples e um resíduo sólido composto de celulose e lignina, sendo necessária uma etapa seguinte para remoção da lignina. Os ácidos mais comuns no processo são o ácido sulfúrico, clorídrico e fosfórico (GROSSI, 2015).

O processo apresenta uma boa eficiência na quebra da hemicelulose, mas tem como desvantagens a geração de inibidores pela degradação dos açúcares, o alto custo dos equipamentos resistentes à corrosão e a baixa eficiência na quebra da celulose (GROSSI, 2015).

2.5.2.3 Solventes orgânicos

Consiste no tratamento da biomassa com uma mistura de solventes orgânicos e catalizadores ácidos. Os solventes hidrolisam parte da hemicelulose e removem a lignina do material lignocelulósico. Uma das maiores vantagens do processo é a recuperação da lignina como subproduto, utilizando um flash a pressão atmosférica seguido por diluição em água e precipitando a lignina (MUKTHAM, 2016).

As principais desvantagens desse processo são as características dos solventes orgânicos, como volatilidade e inflamabilidade. Esses solventes devem ser recuperados após o tratamento para redução de custos e para não afetarem a hidrólise e fermentação. Os mais utilizados são o metanol, etanol, butanol, acetona, benzeno e etilenoglicol (MARTINS, 2018).

2.5.3 Pré-tratamentos biológicos

Os pré-tratamentos biológicos são os que utilizam micro-organismos como fungos e bactérias. Eles secretam enzimas como lignina peroxidases e lacases que degradam os componentes da biomassa (NASCIMENTO, 2011).

Os fungos mais utilizados são os de podridão marrom, branca e mole. A podridão branca e mole atacam a celulose e lignina, enquanto o marrom possui uma maior eficiência contra a celulose. Sua vantagem é a baixa necessidade de energia

e a não necessidade de componentes químicos e condições ambientais drásticas. Porém suas desvantagens são o baixo rendimento e maior tempo de pré-tratamento (MARTINS, 2018).

2.5.4 Pré-tratamentos combinados

Os pré-tratamentos combinados são os que utilizam da combinação de mais de um tipo de tratamento. Eles atuam tanto fisicamente como quimicamente na estrutura do material lignocelulósico (NASCIMENTO, 2011).

2.5.4.1 Hidrotérmico

Neste processo, a biomassa é tratada com água saturada a altas temperaturas e pressões. Nessas condições, a água apresenta caráter ácido e desintegra a rígida matriz lignocelulósica do material. O tempo desse processo varia de 15 a 20 minutos, operando a temperaturas de 200 a 230°C (MUKTHAM, 2016). Esse processo apresenta as vantagens de não trabalhar com componentes altamente corrosivos, apresentar baixo grau de degradação dos açúcares e produção de inibidores. Sua desvantagem é o alto consumo de água e energia para pressurizar e aquecer a água. (MARTINS, 2018).

2.5.4.2 Explosão a vapor

A explosão a vapor é um dos pré-tratamentos mais utilizados, em que se injeta vapor saturado a altas pressões na biomassa e se reduz rapidamente a pressão, causando uma explosão no material pela descompressão. O vapor saturado é inserido a temperaturas de 160 a 260°C e a queda de pressão ocorre pela rápida abertura da válvula do reator (ROLDÁN, 2014).

O processo causa a degradação da hemicelulose e da lignina devido à alta temperatura e energia da explosão, aumentando o acesso à celulose. A explosão hidrolisa a hemicelulose, gerando uma fração sólida de celulose e lignina e uma líquida com os açúcares da hemicelulose, sendo necessária uma etapa de separação dessas frações. Esse pré-tratamento tem as vantagens de gerar bons rendimentos na conversão da biomassa, mas apresenta como desvantagens a produção de inibidores (MARTINS, 2018).

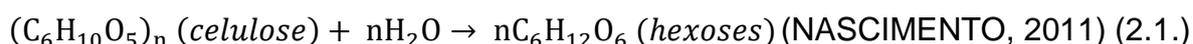
2.5.4.3 Explosão com amônia

O pré-tratamento de explosão com amônia é similar ao de explosão com vapor, em que a biomassa é exposta à amônia líquida a altas pressões e médias temperaturas (60 a 120°C). Depois de um intervalo de tempo, a válvula do reator é aberta gerando uma rápida queda na pressão gerando a explosão. O processo quebra as fibras da biomassa e aumenta o acesso à celulose e hemicelulose (MUKTHAM, 2016).

O tratamento por explosão com amônia tem a vantagem de degradar menos a hemicelulose, gerando menos inibidores, além disso ela é um solvente de fácil recuperação. Porém tem como desvantagem o fato de se tornar ineficiente para biomassas com altos teores de lignina (mais de 25%) (MARTINS, 2018).

2.6 Hidrólise

Após o pré-tratamento da biomassa, ela é submetida ao processo de hidrólise com o objetivo de quebrar a celulose e hemicelulose em açúcares simples que possam ser fermentados para produção de etanol. Existem dois tipos de hidrólise utilizados atualmente, a enzimática e a ácida (SPYRIDON, 2016). As equações 2.1. e 2.2. mostram as equações gerais de hidrólise da hemicelulose e celulose.



2.6.1 Hidrólise ácida

A hidrólise ácida é o processo em que a biomassa tratada é submetida a uma solução de ácido e água para hidrolisar seus componentes e gerar açúcares fermentescíveis. Os processos de hidrólise ácida podem ocorrer com soluções de ácido diluído ou com ácidos concentrados. Sendo utilizados ácidos como o sulfúrico, clorídrico, fluorídrico, fosfórico, nítrico e fórmico (GROSSI, 2015).

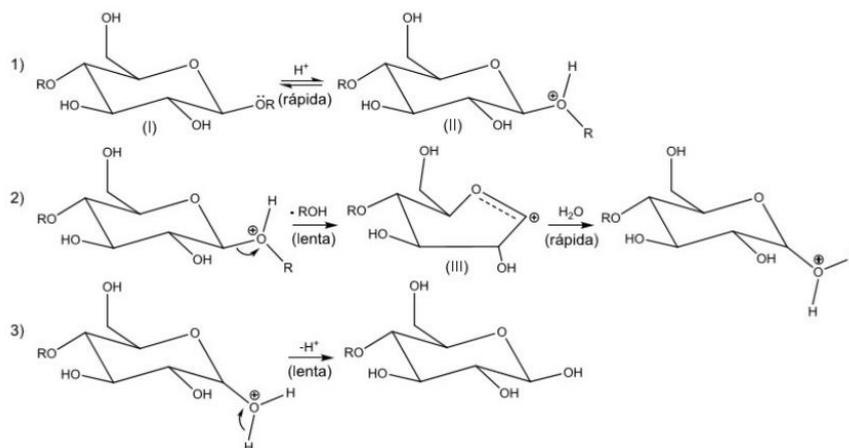
A hidrólise com ácido diluído requer maiores temperaturas, na faixa de 200 a 240°C, para hidrolisar os cristais de celulose (SPYRIDON, 2016). O processo normalmente é realizado em duas etapas, uma a temperaturas mais moderadas, de

140 a 160°C, para quebra da hemicelulose e uma a temperaturas mais elevadas, de 200 a 240°C, para quebra dos cristais de celulose (MARTINS, 2018). Os fatores limitantes dessa hidrólise são as condições de operação a altas temperaturas, que facilita a degradação de açúcares e a geração de inibidores, e o baixo rendimento na geração de açúcares (entre 50 e 60% para glicose) (GROSSI, 2015).

A hidrólise com ácidos concentrados é mais eficiente, uma vez que opera a menores temperatura, possui um maior rendimento na conversão para açúcares simples e gera menos inibidores da fermentação (SPYRIDON, 2016). O processo também é comumente realizado em duas etapas, uma em que usa ácidos diluídos para conversão da hemicelulose e outra com ácidos concentrados para conversão da celulose (MARTINS, 2018). As desvantagens da hidrólise com ácido concentrado são os problemas associados com a corrosão de equipamentos, altos custos de neutralização e recuperação dos ácidos (GROSSI, 2015).

Em ambos os casos, o mecanismo de hidrólise funciona em três etapas. A primeira é a protonação do oxigênio glicosídico que une os monômeros, gerando um ácido conjugado. A segunda etapa é a quebra da ligação C – O do ácido conjugado com a formação do íon carbônio cíclico. Na última etapa, o ataque nucleofílico da água sobre íon carbônio, encerrando o processo de polimerização e liberando um novo próton, que será utilizado em um novo ciclo de hidrólise (ROLDÁN, 2014). A figura 6 mostra o mecanismo de hidrólise ácida.

Figura 6 – Mecanismo de hidrólise ácida das ligações glicosídicas da glicose.



Fonte: Adaptado Grossi 2015.

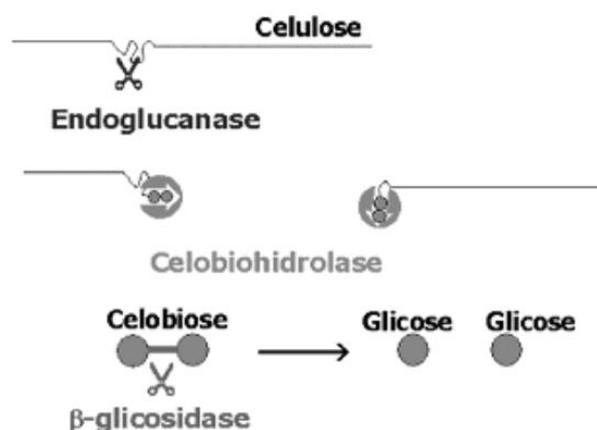
2.6.2 Hidrólise enzimática

O processo de hidrólise enzimática é o processo em que a biomassa tratada é submetida a enzimas geradas por microrganismos para quebrar as ligações poliméricas dos componentes e gerar açúcares fermentescíveis. Ao contrário da hidrólise ácida, ela não apresenta reações secundárias ou formação de inibidores, ela possui menor impacto ambiental e ela ocorre sem a necessidade de extremas temperaturas e pH (FREITAS, 2019).

Os componentes da biomassa são hidrolisados por enzimas celulasas e hemicelulasas, que apresentam alto grau de especificidade. As principais celulasas utilizadas são a endoglucanase ou carboximetilcelulase, exoglucanase ou celobiohidrolase e β -glucosidase que catalisam a hidrólise da celulose em glicose (MUKTHAM, 2016). As principais xilanases utilizadas são a endo-1,4- β -xilanase ou endoxilanase e β -xilosidases, que catalisam a hidrólise das xilanas presentes na hemicelulose em xiloses (DEOTI, 2014).

O mecanismo de hidrólise da celulose funciona em três etapas. A primeira é a ação da endoglucanase que catalisa a hidrólise do polímero da celulose nos centros não cristalinos, liberando pequenas cadeias de extremidades reductoras e não reductoras. A segunda etapa é a ação da exoglucanase ou celobiohidrolase, que agem sobre essas extremidades e geram moléculas de celobiose. Por fim, as celobioses são divididas em glicose pela ação da β -glucosidase (NASCIMENTO, 2011). A figura 7 mostra o mecanismo de hidrólise enzimática da celulose.

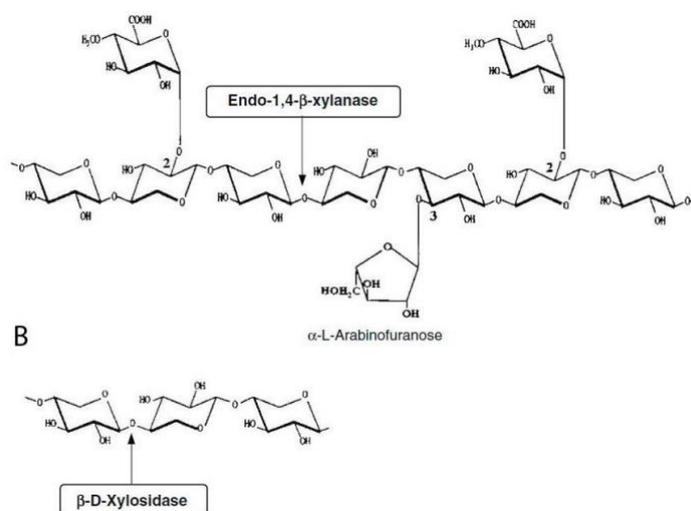
Figura 7 – Esquema da hidrólise enzimática da celulose em glicose.



Fonte: Adaptado Deoti 2014.

O mecanismo de hidrólise das xilanas presentes na hemicelulose funciona em duas etapas. A primeira é dada pela ação da endo-1,4- β -xilanase, que age continuamente na desestruturação da hemicelulose, gerando oligômeros de xilose com menor grau de polimerização. Por fim, os dissacarídeos e os trissacarídeos gerados na primeira etapa são hidrolisados com a ajuda das β -xilosidases, resultando em moléculas de xilose (DEOTI, 2014). A figura 8 mostra o mecanismo de hidrólise enzimática da hemicelulose.

Figura 8 – Mecanismo de hidrólise enzimática da hemicelulose em xilose.



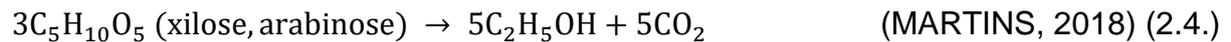
Fonte: Adaptado Deoti 2014.

O processo de hidrólise enzimática possui como vantagens a especificidade das enzimas, a baixa geração de inibidores, as condições amenas de operação (pH próximo de 4,8 e temperatura de 45 a 50°C) e os altos rendimentos (75 a 95%). Porém possui como desvantagens um maior tempo de residência nos reatores e o alto custo das enzimas (MARTINS 2018).

2.7 Fermentação

A fermentação é etapa em que são inseridos microrganismos em condições anaeróbicas na solução hidrolisada para a degradação dos açúcares simples em etanol e outros compostos (SPYRIDON, 2016). O processo de fermentação consiste

em uma série de reações químicas, catalisadas por um complexo enzimático do metabolismo de diferentes microrganismos, que transformam os açúcares produzidos pela hidrólise da celulose e hemicelulose (NASCIMENTO, 2011). As equações 2.3. e 2.4. mostram a reação global da fermentação dos açúcares em etanol.



O microrganismo mais utilizado na fermentação é a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, que fermenta a glicose a temperaturas de 30°C com um rendimento próximo de 90%, mas não possui capacidade de fermentar a xilose (SPYRIDON, 2016). Já leveduras como *Pichia stipitis*, *Candida shehatae* e *Candida parapsilosis* são capazes de fermentar a xilose (MARTINS 2018).

Durante a fermentação, podem ser gerados outros compostos além do etanol e gás carbônico, como o glicerol, ácidos orgânicos (acético e succínico), álcoois e novas leveduras. As condições de operação da fermentação como temperatura, pH, presença de inibidores ou contaminantes e concentração do substrato afetam diretamente no rendimento de produção de etanol pelos microrganismos (NASCIMENTO, 2011).

Após a fermentação, obtém-se uma mistura de vinho fermentado e leveduras. Sendo necessária uma etapa de centrifugação para separação das fases e reaproveitamento das leveduras (MARTINS, 2018).

2.8 Destilação

Por fim o processo se encerra na etapa de destilação, em que o vinho fermentado é aquecido e o etanol é separado dos demais componentes. O processo aproveita das diferentes volatilidades e pontos de ebulição das substâncias do vinho, assim a solução é aquecida no fundo da torre de destilação e os componentes de menor ponto de ebulição são coletados no topo e condensados (TEIXEIRA, 2016).

Para produção de E2G em usinas integradas, o vinho produzido na

fermentação é comumente destilado junto com o vinho do processo de primeira geração na mesma torre. Gerando economias na operação das torres e na compra de equipamentos (MARTINS, 2018).

A separação do etanol consiste em duas etapas de destilação. Na primeira torre, o vinho é destilado gerando o flegma como destilado e a vinhaça como produto de fundo. O calor da vinhaça é reaproveitado aquecendo a corrente de entrada de vinho e a vinhaça é direcionada para o campo como fertilizante ou para produção de biogás. Já o flegma, um destilado rico em etanol e água, é submetido a uma segunda destilação para obtenção do etanol hidratado como destilado e a flegmaça como produto de fundo. Para produção de etanol anidro, é necessária uma etapa seguinte de desidratação por ciclohexano (TEIXEIRA, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste projeto, foram utilizados parâmetros obtidos na literatura e dados divulgados pela Raízen para sua usina produtora de E2G. Com essas informações e o levantamento realizado na seção de revisão bibliográfica, foi desenvolvido um anteprojeto para uma usina de etanol de segunda geração.

3.1 Capacidade de produção

Para estabelecer a capacidade de produção anual da planta de E2G, utilizou-se de dados fornecidos por uma empresa do negócio. A usina em questão possui uma capacidade de moagem de cana igual 17 mil toneladas por dia e gera como resíduo cerca de 4,25 mil toneladas de bagaço. A usina apresenta um processo de cogeração e de todo o bagaço gerado, apenas cerca de 11% sobram do processo de cogeração. Esse bagaço excedente é normalmente armazenado, queimado para geração de e venda de energia, vendido na forma de pellets ou usado na produção de E2G.

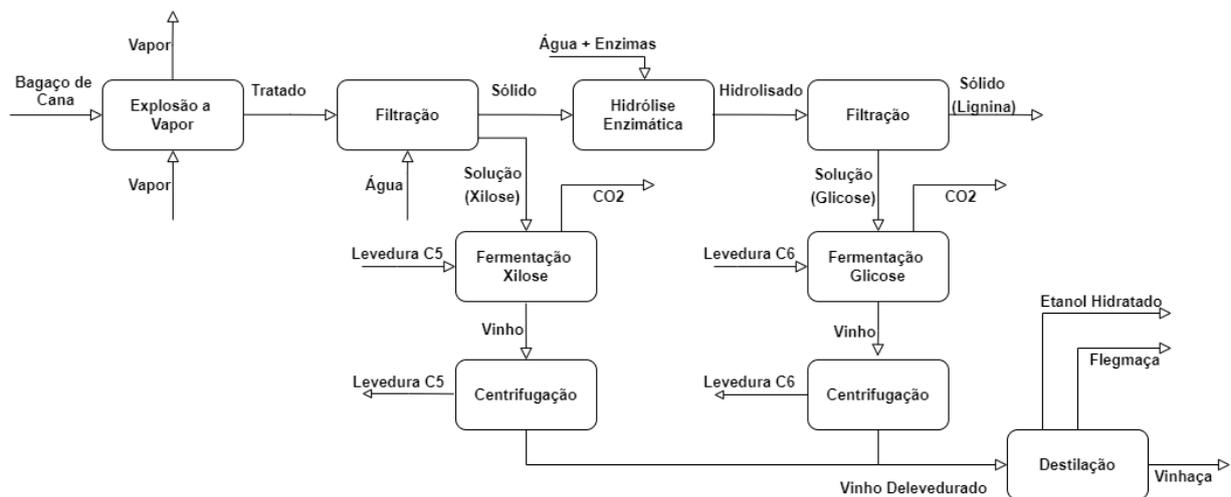
Assim, a capacidade de produção da planta a ser projetada é igual a quantidade de etanol hidratado que pode ser convertido a partir das 476 toneladas diárias excedentes de bagaço. Considerando que a usina irá operar durante 245 dias, a sua capacidade de processamento anual é igual a 116,62 mil toneladas de bagaço.

3.2 Escolha do processo

Para escolher entre as diferentes rotas de produção de etanol lignocelulósico, utilizou-se de informações da literatura acerca das vantagens e desvantagens de cada rota, pela informações divulgadas pela Raízen e pelo processo apresentado na literatura por Salvador (2018).

Assim escolheu-se um processo de produção de etanol a partir do bagaço de cana de açúcar que utiliza da explosão a vapor para pré-tratamento da biomassa, da hidrólise enzimática para geração dos açúcares fermentescíveis e de duas fermentações para geração do etanol, uma para xilose e outra para glicose. A Figura 9 apresenta o fluxograma simplificado do processo escolhido.

Figura 9 – Fluxograma simplificado do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de centralizar o estudo nas etapas mais essenciais e simplificar o projeto, insere-se apenas algumas etapas no limite de bateria. Os limites de bateria estão indicados na Figura 9, onde foram realizados os balanços de massa e energia nas etapas de explosão a vapor, filtrações, hidrólise enzimática, fermentações, centrifugações e destilação, bem como uma análise de custo de utilidades e equipamentos para cada uma.

3.3 Balanços de massa e energia

Para os equipamentos dentro do limite de bateria, realizou-se os balanços de massa e energia para encontrar a temperatura, pressão e composição de cada uma das correntes. Os balanços também foram utilizados para estimar os volumes de cada equipamento. Para os parâmetros de rendimento de cada etapa, utilizou-se as informações fornecidas por Salvador (2018). As equações 3.1. e 3.2. demonstram o cálculo geral dos balanços de massa e energia.

$$\sum \dot{m}_{entra} + \sum \dot{m}_{gerada} - \sum \dot{m}_{sai} - \sum \dot{m}_{consumida} = \frac{dm}{dt} \quad (3.1.)$$

Onde m_{entra} é a massa que entra no volume de controle, m_{gerada} é a massa do componente gerada no processo, m_{sai} é a massa que sai, $m_{consumida}$ é a massa do componente consumida no processo e dm/dt é o acúmulo de massa no volume controle com o tempo.

$$\Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} + \dot{W}_e \quad (3.2.)$$

Onde ΔH é a variação de entalpia, ΔE_c é a variação de energia cinética, ΔE_p é a variação de energia potencial, Q é o calor transferido por uma diferença de temperatura e W_e é o trabalho de eixo. Normalmente, a variação das energias nos fluxos de massa (cinética e potencial) não contribuem para variações na temperatura, assim, desconsiderou-se esses termos nos balanços realizados.

3.4 Avaliação econômica

3.4.1 Índices financeiros

Com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica do projeto, optou-se por utilizar alguns conceitos financeiros recomendados por Turton (2018). O primeiro é o valor presente líquido (VPL), que corresponde ao valor no presente de um fluxo de caixa previsto para o futuro. Ele utiliza do conceito de que o dinheiro possui valor ao longo do tempo e tem como objetivo avaliar o desempenho de um investimento,

verificando se o montante presente pode ser investindo à uma taxa mínima de retorno e receber um retorno positivo.

Para o cálculo do valor presente líquido, adotou-se um valor de 8,5% para taxa mínima atrativa de retorno. A equação 3.3. demonstra o método de cálculo do valor presente líquido.

$$VPL = FCI + \sum_{t=1}^A \frac{FC}{(1 + TMAR)^t} \quad (3.3.)$$

Onde VPL é o valor presente líquido, FCI é o investimento de capital fixo, FC é o valor no fluxo de caixa em um dado ano t, TMAR é a taxa mínima atrativa de retorno e A é o tempo do fluxo de caixa.

Outro conceito financeiro que se optou por utilizar, é a taxa interna de retorno (TIR). Ela é um taxa hipotética que, quando aplicada ao fluxo de caixa, faz com que o valor presente líquido seja nulo. Seu objetivo é indicar o retorno esperado de um projeto ao longo dos anos. A equação 3.4. demonstra o método de cálculo da taxa interna de retorno.

$$VPL = 0 = FCI + \sum_{t=1}^A \frac{FC}{(1 + TIR)^t} \quad (3.4.)$$

Onde VPL é o valor presente líquido, FCI é o investimento de capital fixo, FC é o valor no fluxo de caixa em um dado ano t, TIR é a taxa interna de retorno e A é o tempo do fluxo de caixa.

Também se utilizou o conceito de payback. Ele é o tempo de retorno sobre um investimento, indicando a quantidade de tempo necessária para que o fluxo de caixa acumulado seja suficiente para cobrir o investimento de capital fixo. Ou seja, ele é o período em que o fluxo de caixa acumulado deixa ser negativo e se torna positivo.

O valor do fluxo de caixa a cada ano é um demonstrativo financeiro importante conhecido como lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização (EBITDA). Ou seja, ele é capacidade do projeto gerar caixa, sendo igual ao valor da receita obtida menos os custos operacionais anuais. Para a

montagem do fluxo de caixa e cálculo dos índices financeiros, faz-se necessário estimar os valores de capital a ser investido no projeto, os custos de operação da planta e a receita anual obtida pela venda do produto.

3.4.2 Investimento de capital fixo

Para o cálculo do investimento de capital fixo, utilizou-se um dos métodos apresentados por Turton (2018), em que se calcula o valor total gasto com a compra dos principais equipamentos e multiplica-se pelo fator de Lang referente ao tipo de processo da planta. A equação 3.4. apresenta o método de cálculo do investimento de capital fixo e a tabela 3.1. apresenta os valores do fator de Lang para diferentes plantas.

$$FCI = F_{Lang} \sum_{i=1}^n CE_i \quad (3.4.)$$

Onde FCI é o investimento de capital inicial, F Lang é o fator de Lang e CE é custo de cada um dos principais equipamentos da planta.

Tabela 3.1. – Fator de Lang para cada tipo de planta.

Tipo de planta	Fator de Lang
Plantas apenas com fluídos	4,74
Planta com sólidos e fluídos	3,63
Planta apenas com sólidos	3,10

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Turton (2018).

Considerando que a usina trabalha tanto com materiais sólidos, quanto líquidos, o fator de Lang utilizado é 3,63.

Para estimativa de cada um dos equipamentos da planta, calculou-se, pelos balanços de massa e tempos de residência, o volume total necessário em cada etapa para a capacidade de produção desejada. A equação 3.5. demonstra o cálculo do volume dos equipamentos.

$$V_{equip} = 1,25 \cdot \tau \cdot Q / n_{equip} \quad (3.5.)$$

Onde V_{equip} é o volume do equipamento, τ é o tempo de duração do processo, Q é a vazão volumétrica de entrada e n_{equip} é a quantidade de equipamentos na etapa. O volume foi multiplicado por um fator de segurança de 1,25, garantindo que os equipamentos não sejam totalmente preenchidos no processo. O número de equipamentos foi escolhido arbitrariamente para garantir que volume de cada seja menor que 200 m³.

Com os volumes, encontrou-se o valor associado a cada equipamento no site Matches (2014). Para a correção dos valores obtidos, utilizou-se do Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) e do valor da cotação do mês de julho do dólar.

3.4.3 Custo de operação

Calculado o valor a ser investido inicial no projeto, faz-se necessário estimar os custos associados com a operação. Estes custos farão parte do fluxo de caixa anualmente, uma vez que a operação da planta é contínua ao longo dos anos. Para o cálculo deste parâmetro, pode-se considerar uma grande diversidade de custos operacionais, mas optou-se a considerar o modelo proposto por Turton (2018). Segundo o autor, o gasto com a operação pode ser composto por apenas cinco parâmetros, o investimento de capital fixo, custos com funcionários, custo com utilidades, custo com tratamento de resíduos e o custo com matérias-primas. A equação 3.6. demonstra o método de cálculo do custo de operação.

$$CO = FCI \cdot 0,18 + CF \cdot 2,73 + 1,23 \cdot (CU + CR + CM) \quad (3.6.)$$

Onde CO é o custo operacional, FCI é o investimento de capital inicial, CF é o custo com funcionários, CU é o custo com utilidades, CR é o custo com tratamento de resíduos e CM é o custo com matérias-primas.

Com o intuito de simplificar os cálculos, o custo associado ao tratamento de resíduos será desconsiderado da análise. Uma vez que o tratamento de resíduos

não faz parte do limite de bateria apresentado, além disso, os principais resíduos do processo, a lignina, a vinhaça e a flegmaça, podem ser aproveitados, respectivamente, na queima para geração de energia e vapor na caldeira, no campo como fertilizante e na assepsia dos equipamentos.

Segundo Turton (2018), o custo anual com funcionários é dado pelo número de funcionários operantes por turno de trabalho, a quantidade de funcionários contratados e o custo de cada operário. A equação 3.7. demonstra o método de cálculo do custo com funcionários.

$$CF = NFO.NFC.CC \quad (3.7.)$$

Onde CF é o custo anual com funcionários, NFO é o número de funcionários operantes por turno, NFC é o número de funcionários contratados para cada funcionário operante por turno e CC é o custo por cada funcionário contratado.

O número de funcionários por turno é calculado pela equação 3.8.

$$NFO = (6,29 + 0,23.NPE)^{0,5} \quad (3.8.)$$

Onde NFO é o número de funcionários operantes por turno e NPE é o número de equipamentos principais no processo.

Para Turton (2018), cada funcionário trabalha cerca de 5 turnos de 8 horas por semana, totalizando 245 turnos ao ano por operário. O número de turnos realizados por ano é calculado pelo período de operação da usina, assumindo que ela opera durante 245 dias ao ano por 24 horas por dia com um total de 3 turnos de 8 horas por dia, tem-se que o número total de turnos por ano é 735 turnos. Assim, a razão entre a quantidade de turnos realizados ao ano e a quantidade de turnos que cada operador realiza ao ano resulta na quantidade de funcionários que devem ser contratados para cada operário operante em cada turno, totalizando em 3 funcionários contratados para cada operário necessário na planta.

Para o custo associado com cada funcionário, considerou-se um salário equivalente a três salários-mínimos de R\$ 1.212,00 mensais (valor referente a agosto de 2022) mais um adicional de 75% referente a contratação, encargos e

benefícios. Totalizando R\$ 76.356,00 anuais por funcionário contratado.

Assim a equação 3.7. pode ser reescrita para equação 3.9.

$$CF = 229068. (6,29 + 0,23. NPE)^{0,5} \quad (3.9.)$$

Onde CF é o custo anual com funcionários e NPE é o número de equipamentos principais no processo.

O custo com matéria-prima é composto pela multiplicação do volume utilizado de cada matéria-prima por ano e do valor gasto por unidade consumida. As principais matérias primas são o bagaço de cana-de-açúcar, as enzimas utilizada na hidrólise enzimática, as leveduras utilizadas na fermentação e o ácido de tratamento das leveduras. Os custos unitários de cada matéria-prima estão resumidos na tabela 3.2.

Tabela 3.2. – Custo unitário de cada matéria-prima.

Matéria Prima	Custo por Unidade (R\$/ton)
Enzima	4.890,68
Levedura (glicose)	1.055,00
Levedura (xilose)	1.080,00

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Salvador (2018).

Em relação ao custo com o bagaço da cana de açúcar, considera-se um gasto nulo, uma vez que a quantidade consumida na usina será o excedente do processo de produção de etanol de primeira geração com cogeração.

O custo com utilidades é composto pela multiplicação do volume utilizado de cada utilidade por ano e do valor gasto por unidade consumida. As principais utilidades utilizadas são energia elétrica, água de resfriamento e vapor de aquecimento. Os custos unitários de cada utilidade estão resumidos na tabela 3.3.

Tabela 3.3. – Custo unitário de cada utilidade.

Matéria Prima	Custo por Unidade
Energia Elétrica	R\$ 594,49 /MWh
Água corrente	R\$ 25,52 /m ³

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado SABESP (2022) e ENEL (2022).

Em relação ao custo com o energia elétrica e vapor, considera-se um gasto nulo, uma vez que, segundo Salvador (2018), a queima da lignina residual na caldeira da usina é suficiente para geração de energia e vapor necessários.

3.4.4 Receita anual

Para o cálculo da receita anual, leva-se em conta dois parâmetros, o volume a ser comercializado do produto gerado e o preço de venda para cada unidade deste produto. Para o volume comercializado do produto, considerou-se que a planta produziu etanol hidratado na sua máxima capacidade durante todos os 245 dias de trabalho da safra e que todo o produto gerado é vendido no seu ano de produção.

Em relação ao preço de venda do etanol hidratado, como se trata de uma commodity, o seu valor depende de diversos aspectos econômicos, políticos e sociais, existindo uma grande variação com o passar do tempo, sendo difícil projetar com confiança o seu valor no futuro. Assim, para fins de simplificar o estudo e se baseando nos valores de 2022, considerou-se que o preço médio de venda do etanol hidratado se mantêm constante a R\$ 3,00 o litro.

Além da receita gerada pela produção e venda de etanol hidratado, a usina também gera créditos de descarbonização (CBios) pela produção do etanol que podem ser comercializados para um suplemento na receita. Um CBio equivale a redução de 1 tonelada de CO₂ emitido pela utilização de biocombustíveis. Para o cálculo de quantos CBios são produzidos pelo volume de E2G produzido, utilizou-se a relação apresentada por Lima (2020) de 1.652,49 gramas de CO₂ não emitidos pela utilização de um litro de etanol lignocelulósico produzido. Assim como o etanol, os créditos de carbono apresentam uma grande variação no seu valor com o tempo, por isso, baseou-se nos valores de 2022 e considerou-se que o preço médio de

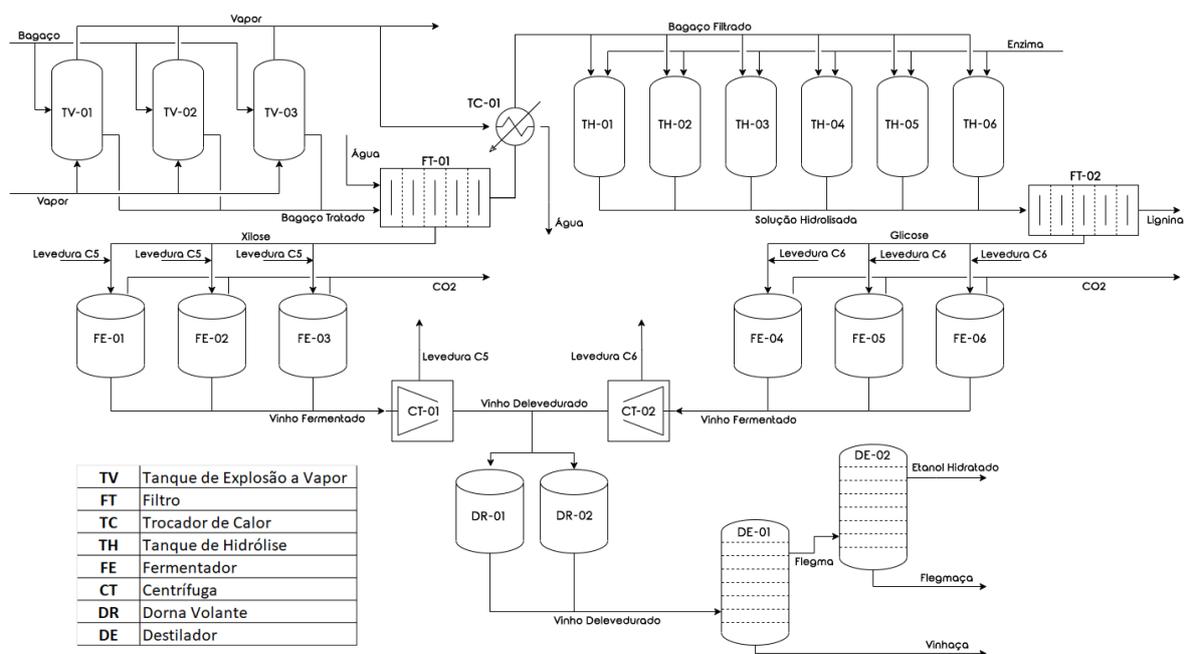
venda de um CBio se mantêm constante a R\$ 200,00 a unidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se da metodologia descrita, foi possível obter-se resultados e conclusões sobre o projeto do ponto de vista técnico e econômico. Levando em conta que a planta opera durante 245 dias ao ano, que ela recebe 476 toneladas de bagaço ao dia e que seu processo é igual ao descrito na metodologia, encontraram-se os seguinte resultados.

4.1 Fluxograma do processo

Figura 10 – Fluxograma do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 10 apresenta o fluxograma final da planta. O bagaço excedente da usina de primeira geração é levado para os tanques de explosão a vapor (TV-01 a 03), em que são tratados com vapor saturado a altas temperatura e pressão. O processo possui um rendimento de 70% para conversão da hemicelulose e dura cerca de 15 min. Para processar todo o bagaço desejado, são necessários 3 tanques de 194,9 m³ cada. A tabela 4.1. apresenta os resultados dos balanços de

massa e energia para cada corrente envolvida no processo de explosão a vapor.

Tabela 4.1. – Composições das correntes da explosão a vapor.

	Entradas		Saídas	
	Bagaço	Vapor	Bagaço Tratado	Vapor
T (°C)	25	190	100	100
P (atm)	1	12	1	1
Total (ton/dia)	476,00	261,80	476,00	261,80
Celulose (ton/dia)	99,96	0,00	99,96	0,00
Hemicelulose (ton/dia)	71,40	0,00	21,42	0,00
Lignina (ton/dia)	47,60	0,00	47,60	0,00
Água (ton/dia)	238,00	0,00	238,00	0,00
Outros (ton/dia)	19,04	0,00	19,04	0,00
Vapor (ton/dia)	0,00	261,80	0,00	261,80
Xilose (ton/dia)	0,00	0,00	49,98	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o pré-tratamento, obtém-se uma mistura de duas fases, uma sólida rica em celulose e lignina e uma líquida rica em xilose. Para separação dessas duas fases, utiliza-se de um filtro (FT-01). A eficiência considerada do filtro na separação das duas frações é de 98% em massa. A tabela 4.2. apresenta os resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida no processo de filtração.

Tabela 4.2. – Composições das correntes de filtração.

	Entradas		Saídas	
	Bagaço Tratado	Água	Bagaço Filtrado	Xilose
T (°C)	100	25	48	48
P (atm)	1	1	1	1
Total (ton/dia)	476,00	285,60	175,12	586,48
Celulose (ton/dia)	99,96	0,00	99,96	0,00
Hemicelulose (ton/dia)	21,42	0,00	21,42	0,00
Lignina (ton/dia)	47,60	0,00	47,60	0,00
Água (ton/dia)	238,00	285,60	4,76	518,84
Outros (ton/dia)	19,04	0,00	0,38	18,66
Xilose (ton/dia)	49,98	0,00	1,00	48,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

A solução rica em xilose é direcionada para os fermentadores (FE-01 a 03) e a fração sólida é direcionada para os tanques de hidrólise (TH-01 a 06) para quebra da celulose e geração de glicose. Antes do processo de hidrólise, o bagaço filtrado é lavado com água corrente, igual a duas vezes a massa da torta retirada do filtro, e aquecido em um trocador de calor (TC-01) para temperatura ideal de hidrólise de 50°C.

Nos tanques de hidrólise, o bagaço filtrado entra em contato com a enzima Cellic CTec 2 para hidrólise da celulose. O processo dura cerca de 36 horas com um rendimento de 80% em massa na geração de glicose. O calor gerado pela hidrólise é desprezado, uma vez que ele não é forte o suficiente para gerar grandes variações na temperatura do reator. Para a hidrólise, foram necessários 6 tanques de volume igual a 170,8 m³ cada. A tabela 4.3. apresenta os resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida no processo de hidrólise.

Tabela 4.3. – Composições das correntes de hidrólise.

	Entradas		Saídas
	Bagaço Filtrado	Enzima	Hidrolisado
T (°C)	50	25	50
P (atm)	1	1	1
Total (ton/dia)	525,36	19,96	545,32
Celulose (ton/dia)	99,96	0,00	19,99
Hemicelulose (ton/dia)	21,42	0,00	4,28
Lignina (ton/dia)	47,60	0,00	47,60
Água (ton/dia)	355,00	0,00	355,00
Outros (ton/dia)	0,38	0,00	0,38
Xilose (ton/dia)	1,00	0,00	18,14
Glicose (ton/dia)	0,00	0,00	79,97
Enzima (ton/dia)	0,00	19,96	19,96

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a hidrólise, a solução hidrolisada é direcionada para um segundo filtro (FT-02) para separação da lignina residual e da glicose fermentável. O processo possui um rendimento de 95% para filtragem. A lignina residual é reaproveitada e

queimada na caldeira para geração de energia e vapor, já a solução rica em glicose é levada para as dornas de fermentação (FE-04 a 06) para geração de etanol. A tabela 4.4. apresenta os resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida no processo de filtragem.

Tabela 4.4. – Composições das correntes de filtragem.

	Entradas	Saídas	
	Hidrolisado	Lignina	Glicose
T (°C)	50	50	50
P (atm)	1	1	1
Total (ton/dia)	545,32	95,55	449,78
Celulose (ton/dia)	19,99	19,99	0,00
Hemicelulose (ton/dia)	4,28	4,28	0,00
Lignina (ton/dia)	47,60	47,60	0,00
Água (ton/dia)	355,00	17,75	337,25
Outros (ton/dia)	0,38	0,02	0,36
Xilose (ton/dia)	18,14	0,91	17,23
Glicose (ton/dia)	79,97	4,00	75,97
Enzima (ton/dia)	19,96	1,00	18,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa de fermentação, são realizados dois processos, a fermentação da corrente rica em xilose separada na primeira filtragem e a da corrente rica em glicose separada na segunda filtragem. As leveduras utilizadas foram *Scheffersomyces stipitis* e *Saccharomyces cerevisiae* para fermentação da xilose e da glicose respectivamente. O processo possui uma eficiência de 46% em massa para geração de etanol, durando cerca de 16h para uma batelada. Para a fermentação da xilose, foram necessários 3 dornas de volume igual a 125 m³ cada, já para fermentação da glicose, foram 3 dornas de volume igual a 163 m³ cada.

A temperatura ideal de operação para ambas as fermentações é de 30°C, durante a fermentação, é gerado cerca de 36,8 GJ/dia para o processo com xilose e 47,6 GJ/dia para o processo com glicose, sendo necessária uma corrente de água de resfriamento para manter a temperatura estável por todo o período. As tabelas 4.5. e 4.6. apresentam os resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida nos processos de fermentação.

Tabela 4.5. – Composições das correntes de fermentação da xilose.

	Entradas		Saídas	
	Xilose	Levedura	Vinho	CO ₂
T (°C)	48	25	30	30
P (atm)	1	1	1	1
Total (ton/dia)	586,48	0,16	565,12	21,52
Água (ton/dia)	518,84	0,00	518,84	0,00
Outros (ton/dia)	18,66	0,00	18,66	0,00
Xilose (ton/dia)	48,98	0,00	4,86	0,00
Levedura C5 (ton/dia)	0,00	0,16	0,23	0,00
CO₂ (ton/dia)	0,00	0,00	0,00	21,52
Etanol (ton/dia)	0,00	0,00	22,53	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.6. – Composições das correntes de fermentação da glicose.

	Entradas		Saídas	
	Glicose	Levedura	Vinho	CO ₂
T (°C)	50	25	30	30
P (atm)	1	1	1	1
Total (ton/dia)	449,78	0,25	416,63	33,40
Água (ton/dia)	337,25	0,00	337,25	0,00
Outros (ton/dia)	19,33	0,00	19,33	0,00
Xilose (ton/dia)	17,23	0,00	17,23	0,00
Glicose (ton/dia)	75,97	0,00	7,47	0,00
Levedura C6 (ton/dia)	0,00	0,25	0,38	0,00
CO₂ (ton/dia)	0,00	0,00	0,00	33,40
Etanol (ton/dia)	0,00	0,00	34,97	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os vinhos gerados nas fermentações são centrifugados (CT-01 e 02) para separação e reutilização das leveduras. Para ambas as centrifugações, considerou-se um rendimento de 95% na separação das leveduras do vinho. As tabelas 4.7. e 4.8. apresentam os resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida nos processos de centrifugação.

Tabela 4.7. – Composições das correntes de centrifugação da levedura *Scheffersomyces stipitis*.

	Entradas		Saídas	
	Vinho	Vinho delevedurado	Levedura	
T (°C)	30	30	30	
P (atm)	1	1	1	
Total (ton/dia)	565,12	536,66	28,46	
Água (ton/dia)	518,84	492,90	25,94	
Outros (ton/dia)	23,52	22,34	1,18	
Levedura C5 (ton/dia)	0,23	0,01	0,22	
Etanol (ton/dia)	22,53	21,40	1,13	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.8. – Composições das correntes de centrifugação da levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

	Entradas		Saídas	
	Vinho	Vinho delevedurado	Levedura	
T (°C)	30	30	30	
P (atm)	1	1	1	
Total (ton/dia)	416,63	395,45	21,17	
Água (ton/dia)	337,25	320,39	16,86	
Outros (ton/dia)	44,03	41,83	2,20	
Levedura C6 (ton/dia)	0,38	0,02	0,36	
Etanol (ton/dia)	34,97	33,22	1,75	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, os vinhos delevedurados são unidos e armazenados em dornas volantes (DR-01 e 02) para descanso do material. Das dornas volantes, o vinho é levado para as colunas de destilação (DE-01 e 02) para separação do etanol produzido na fermentação. O processo possui um rendimento de 99% em massa na recuperação do etanol e o produto gerado tem um teor alcoólico igual a 93,6% em massa. O etanol hidratado é resfriado para posterior armazenagem e venda, enquanto a flegmaça gerada é utilizada na assepsia dos equipamentos e a vinhaça é redirecionada para o campo como fertilizante. A tabela 4.9. apresenta os

resultados dos balanços de massa e energia para cada corrente envolvida no processo de filtração.

Tabela 4.9. – Composições das correntes de destilação.

	Entradas		Saídas	
	Vinho delevedurado	Vinhaça	Flegmaça	Etanol Hidratado
T (°C)	30	112	106	25
P (atm)	1	1	1	1
Total (ton/dia)	932,11	792,91	81,44	57,76
Água (ton/dia)	813,29	728,27	81,33	3,68
Outros (ton/dia)	64,20	64,20	0,00	0,00
Etanol (ton/dia)	54,62	0,44	0,11	54,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Avaliação econômica

Para o cálculo de custo dos equipamentos, considerou-se como principais equipamentos os tanques de explosão a vapor, os filtros, os tanque de hidrólise, os fermentadores, as centrífugas e as dornas volantes. O preço do destilador foi desconsiderado, uma vez que o vinho produzido na usina de E2G é destilado no mesmo equipamento do vinho produzido na usina de E1G, assim não é necessária a compra de um novo equipamento, além disso, a quantidade de vinho processado na destilaria não aumenta de maneira significativa para estimar o custo de expansão do equipamento. A tabela 4.10. apresenta os principais equipamentos, as respectivas quantidades e o custo final. Para correção dos valores, utilizou-se o valores do CEPCI de 576,10 para 2014 e 810,10 para 2022 e o valor do dólar como R\$ 5,37.

Tabela 4.10. – Principais equipamentos e seus custos.

Equipamentos	Unidades	Valor unitário 2014 (U\$)	Valor unitário 2022 (U\$)	Valor Total 2022 (R\$)
Tanque Vapor	3	208.600,00	293.329,04	4.723.309,92
Filtro	2	25.900,00	36.420,05	390.967,49
Tanque Hidrólise	6	137.300,00	193.068,44	6.217.741,62
Dorna C6	3	168.500,00	236.941,24	3.815.329,44
Dorna C5	3	192.000,00	269.986,46	4.347.437,70
Centrifuga	2	52.100,00	73.261,95	786.463,56
Dorna Volante	2	51.500,00	72.418,24	777.406,39

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o custo dos principais equipamentos e o fator de Lang de 3,62, calculou-se o valor do investimento de capital fixo pela equação 3.4. Chegando a um valor de R\$ 76.442.921,70.

Com os principais equipamentos, calculou-se o custo de operação com mão de obra da usina pela equação 3.9. Já com os cálculos dos balanços de massa e energia realizados, calculou-se o custo com o consumo de matéria-prima e utilidades consumidas durante o processo. Com os custos de operação, calculou-se o valor dos custos anuais da usina pela equação 3.7. Chegando a um valor de R\$ 42.531.618,69. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 4.11.

Tabela 4.11. – Custos de operação.

Utilidades	ton/ano	R\$/ton	R\$/ano
Água corrente	560.773,63	25,52	14.310.943,07
Matéria Prima	ton/ano	R\$/ton	R\$/ano
Levedura C5	40,00	1.080,00	43.200,71
Levedura C6	62,04	1.055,00	65.454,14
Enzima	4.891,11	1.495,00	7.312.213,59
Mão-de-Obra	Principais Equipamentos	R\$/pessoa	R\$/ano
Pessoal	19	76.356,00	747.899,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a quantidade etanol produzido por ano obtido no balanço de massa, calculou-se a quantidade de CBios emitidos e a receita obtida pela venda do etanol hidratado e dos CBios gerados, chegando a uma receita anual total de

R\$ 58.360.163,01. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 4.12.

Tabela 4.12. – Receitas geradas.

Receita	un./ano	R\$/un.	R\$/ano
Etanol hidratado (L)	17.522.954	3,00	52.568.861,78
CBios (un.)	28.957	200,00	5.791.301,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

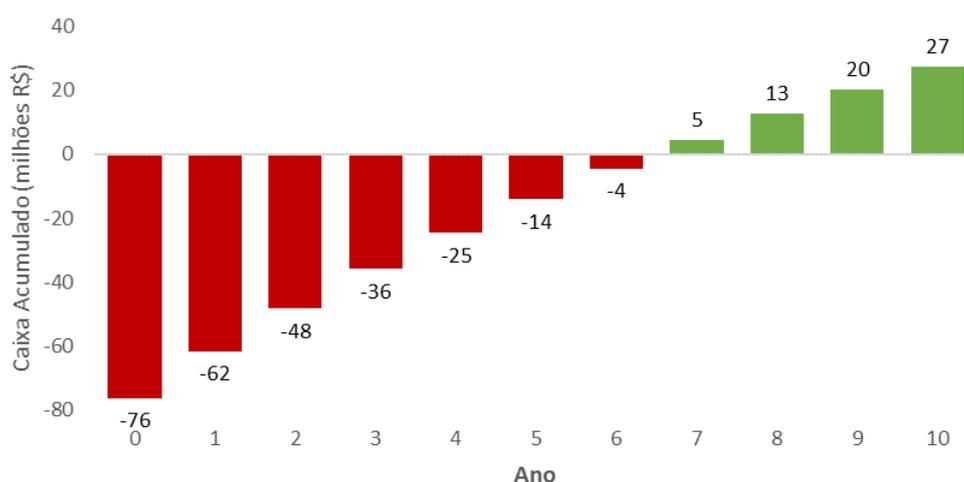
Por fim, a viabilidade econômica do projeto é avaliada pelas técnicas de VPL, TIR e payback. Para isso, calculou-se o valor de EBITDA gerado anualmente e montou-se o fluxo de caixa para os futuros 10 anos de operação da usina. A tabela 4.13. apresenta o valor de EBITDA gerado anualmente e a figura 4.2 apresenta o fluxo de caixa acumulado.

Tabela 4.13. – EBITDA anual.

Investimento de Capital Fixo (R\$)	Custo de Operação (R\$/ano)	Receita (R\$/anual)	EBITDA (R\$/ano)
76.442.921,70	42.531.618,69	58.360.163,01	15.828.544,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Fluxo de Caixa Acumulado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o fluxo de caixa construído e o valor de EBITDA gerado anualmente, calculou-se os valores dos índices financeiros VPL, TIR e payback. Os resultados estão indicados na tabela 4.14.

Tabela 4.14. – Valores de VPL, TIR e payback.

VPL	TIR	Payback
R\$ 25.266.052,42	16%	7 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliando o valor de VPL, o projeto é economicamente viável e indica um ganho futuro pelo seu valor ser positivo. A TIR apresenta um valor superior ao da taxa mínima atrativa de 8,5%, assim o projeto se mostra economicamente atrativo, gerando um retorno de 16% ao ano. Já, o valor de payback de 7 anos indica que o projeto é um investimento de longo prazo, onde só se cobre o valor do investimento inicial e se lucra sobre o projeto a partir do décimo ano de operação da planta.

5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das hipóteses assumidas e dos cálculos realizados neste trabalho, foi possível analisar e estudar de forma simplificada o processo de produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

O processo já se mostra economicamente viável pelas usinas já operantes no país e possui diversas vantagens como um maior aproveitamento da área planta e um incremento na redução de emissão de gases estufa. Além disso, a produção não é limitada pela época do ano, podendo operar durante o período entressafra e consolidando o E2G como um bom suplemento à produção comum de etanol.

A produção de E2G no Brasil possui um grande potencial considerando a posição que o país apresenta na produção de etanol de primeira geração e a quantidade de bagaço gerado todos os anos. Mas o aproveitamento é ainda muito baixo, principalmente pelo baixo número de plantas operantes, pela falta de tecnologia e incentivos públicos/privados. No que a produção de E2G é interessante pelas vantagens ambientais, ela não se mostra competitiva economicamente a uma simples expansão da produção de etanol de primeira geração.

Mas, considerando a ampla versatilidade da cana de açúcar e a grande variação no mercado de commodity, se mostra interessante investir em novas fontes de renda para um usina de etanol. Uma usina totalmente integrada que gera etanol de primeira geração, açúcar, energia, etanol de segunda geração e biogás tem a vantagem de poder controlar a quantidade que produz de cada produto com a variação dos preços, garantindo um maior aproveitamento econômico da cana e uma maior segurança na sua renda.

O projeto desenvolvido apresentou resultados satisfatórios no quesito econômico, indicando a sua viabilidade em todas as análises feitas de valor presente líquido, taxa interna de retorno e payback. Porém, as premissas e simplificação assumidas durante os cálculos apresentam um grande impacto na avaliação realizada pois reduzem consideravelmente os custos de investimento inicial como estrutura da planta e os custos de operação como matéria-prima e utilidades. Além disso, os fatores econômicos como preço do dólar, valor do etanol e preço do CBio foram considerados constantes com o tempo, mas possuem grandes variações com a situação geopolítica e econômica do período, afetando de maneira significativa o EBITDA gerado anualmente.

Como sugestão para de expansão do estudo realizado, fica a utilização de simuladores de processo para como o Aspen ou o DWSIM, uma vez que eles permitem um estudo mais complexo dos equipamentos utilizados, rendimentos, demandas energéticas, custos e demais análises de sensibilidade importante para implementação de uma planta. Um maior conhecimento desses parâmetros garante um resultado mais assertivo.

Por fim, apesar das simplificações na sua execução, o trabalho cumpriu o seu papel de analisar previamente a viabilidade técnica e econômica de uma planta de etanol de segunda geração, contribuindo para o desenvolvimento do tema e estimulando discussões acerca do tema, buscando uma maior aproveitamento dos resíduos agroindustriais e a redução de efeitos climáticos.

6 REFERÊNCIAS

ANP. **Etanol**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>>. Acesso em: 02 set. 2022.

ANP. **Resolução Nº 19-2015**. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-19-015?origin=instituicao&q=19/2015>>. Acesso em: 02 set. 2022.

CETESB. **Etanol**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/12/Etanol.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2022.

DEMIRVAS, A. Progress and Recent Trend in Biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, 2007.

DEOTI, J. R. **Hidrólise de Xilana e Metabolização de Xilose por Leveduras Isoladas da Biomassa Lignocelulósica em Decomposição**. 2014. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal da Fronteira Sul, Santa Catarina, 2014.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROCHA, G. J. M.; PRADELLA, J. G. C.; ROSSELL, C. E. V.; FILHO, R. M.; BONOMI, A. Second Generation Ethanol in Brazil: Can it Compete with Electricity Production? **Bioresource Technology**. Brasil, jul. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411009254?via%3Dihub>>. Acesso em: 02 set. 2022.

EMBRAPA. **Estudo Mostra que Etanol de Cana Emite Menos Gás Carbônico para a Atmosfera do que a Gasolina**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18044516/estudo-mostra-que-etanol-de-cana-emite-menos-gas-carbonico-para-a-atmosfera-do-que-a-gasolina>>. Acesso em: 02 set. 2022.

ENEL. **Simulador Tarifa Branca**. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/simulador-tarifa-branca.html>>. Acesso em: 02 set. 2022.

EPE. **Renovabio**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio>>. Acesso em: 02 set. 2022.

EPE. **Etanol Lignocelulósico ou de Segunda Geração – E2G**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-628/FS-EPE-DPG-SDB-2021-01-E2G_PT.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022.

FAPESP. **Proálcool**. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/proalcool-uma-das-maiores-realizacoes-do-brasil-baseadas-em-ciencia-e-tecnologia/24432>>. Acesso em: 02 set. 2022.

FREITAS, C. **Hidrólise Enzimática de Hemicelulose do Pseudocaule de Bananeira com Enxoxilanase de *Aspegillus versicolor* para Produção de Xilo-Oligossacarídeos e Avaliação do seu Efeito Prebiótico**. 2019. 84 f. Dissertação

(Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.

GROSSI, E. C. **Produção de Etanol de Segunda Geração a partir de um Derivado de Celulose**. 2015. 77 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

HOFFELDER, J. **Pellets de Bagaço de Cana-de-Açúcar na Matriz Energética**. 2011. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LIMA, I. C. M. A. **Perspectivas e Propostas para a Expansão do Biogás no Brasil**. 2020. 141 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. O Etanol de Segunda Geração no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**. Brasil, v. 34, n. 100, mar. 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/j5wbmgNHJcNh8YDM7L98Gzx/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 02 set. 2022.

MARTINS, C. Z. **Avaliação da Produção de Etanol de Segunda Geração**. 2018. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MATCHES. **Equipment Costs**. Disponível em: <<https://www.matche.com>>. Acesso em: 02 set. 2022.

MUKTHAM, R.; BHARGAVA, S. R.; BANKUPALLI, S.; BALL, A. S. A Review on 1st and 2nd Generation Bioethanol Production-Recent Progress. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**. Australia, v. 6, n. 3, set. 2016. Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=70449>>. Acesso em: 02 set. 2022.

NASCIMENTO, V. M. **Pré-Tratamento Alcalino do Bagaço de Cana-de-Açúcar para Produção de Etanol e Obtenção de Xilooligômeros**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

NOVACANA. **Custo de Produção Estimado do Etanol Celulósico nas 6 Maiores Usinas do Mundo**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/etanol/2-geracao-celulose/custo-producao-etanol-celulosico-usinas-mundo-150316>>. Acesso em: 02 set. 2022.

NOVACANA. **Como é Feito o Processamento da Cana-de-Açúcar nas Usinas**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>>. Acesso em: 02 set. 2022.

RAÍZEN. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2021-2022**. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/relatorioanual/2022/pt/pdf/RS2021_RAIZEN_PT.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022.

RÓLDAN, I. U. M. **Pré-Tratamento do Bagaço de Cana-de-Açúcar, Hidrólise e sua Caracterização Química e Estrutural, Visando a Produção de Etanol de Segunda Geração**. 2014. 159 f. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2014.

SABESP. **Tarifas**. Disponível em: <<https://agenciavirtual.sabesp.com.br/web/guest/tarifas>>. Acesso em: 02 set. 2022.

SALVADOR, A. T. **Cálamo: indústria de etanol 2G**. 2018. 230 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2018.

SPYRIDON, A.; EUVERINK, G. W. Consolidated briefing of biochemical ethanol production from lignocellulosic biomass. **Electron. J. Biotechnol.** jan. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071734582016000500009&lng=es&nrm=iso>. Acesso em 02 set. 2022.

TEIXEIRA, E. P.; ZUFFI, F. R. **Sistema de Controle Fuzzy de Colunas de Destilação de Etanol**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, XXI., 2016. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

TOWERING SKILLS. **Cost Indices**. Disponível em: <<https://www.toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices>>. Acesso em: 02 set. 2022.

TURTON, R.; BAILIE, R.C.; WHITING, W.B.; SHAEIWITZ, J. A. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process**. Prentice Hall, NJ, 1998.