



Análise da Viabilidade Econômica da utilização de Bagaço de Malte para Produção de Etanol 2G e Querosene de Aviação

Carolina Ferreira de Abreu
Gustavo Martins Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientadoras

Yordanka Reyes Cruz
Neyda de la Caridad Om Tapanes

21 de outubro de 2021

Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Bagaço de Malte para Produção de Etanol 2G e Querosene de Aviação

Carolina Ferreira de Abreu

Gustavo Martins Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, apresentado ao Corpo Docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Aprovado em: __/__/__

Aprovado por:

Marcelo Mendes Viana, DSc.

Leonard Guimarães Carvalho, DSc.

Orientado por:

Profa. Yordanka Reyes Cruz, DSc.

Profa. Neyda de la Caridad Om Tapanes, DSc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

21 de outubro de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Abreu, Carolina Ferreira de

Pereira, Gustavo Martins

Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Bagaço de Malte para Produção de Etanol 2G e Querosene de Aviação / Carolina Ferreira de Abreu, Gustavo Martins Pereira: UFRJ/EQ, 2021

(Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadora: Yordanka Reyes Cruz

Coorientadora: Neyda de la Caridad Om Tapanes

1. Bagaço de malte. 2. Etanol de segunda geração. 3. Bioquerosene de aviação.
4. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação UFRJ/EQ).

AGRADECIMENTOS

Gustavo Martins Pereira

Agradeço,

Primeiramente a Deus, por ter me abençoado durante toda minha vida, me dando saúde e força para seguir em frente todos os dias.

À minha mãe, Marilene, por seu amor incondicional, sempre confiando em mim e me apoiando durante toda minha vida. Sem você, eu não conseguiria chegar onde cheguei. Você é meu espelho e meu maior orgulho.

À minha namorada, Luizi, por estar do meu lado, sonhando junto comigo, me dando força nos momentos difíceis e sendo minha melhor companhia. Você é uma das pessoas mais fortes e determinadas do mundo. Obrigado por me ensinar tanto e nunca desistir de mim.

À minha amiga Carolina, por estar comigo desde o início da graduação, me acompanhando em cada etapa, tanto nos momentos bons quanto nos ruins, sempre que olhava para o lado, você estava ali. Vou ser eternamente grato pela sua amizade.

À minha avó, Eliza, por ter cuidado de mim desde sempre. A pessoa mais amável que eu já conheci, sempre preocupada no bem estar da família. Você sempre esteve do meu lado em todos os momentos, e serei eternamente grato pelo seu amor.

A todos da minha família, por sempre terem acreditado no meu potencial, me apoiando mesmo quando eu duvidava de mim mesmo.

Aos meus amigos, pelas risadas e pelos momentos felizes. Vocês fizeram a caminhada ficar mais leve. Obrigado pela contribuição de cada um durante minha trajetória.

Às minhas orientadoras, professora Yordanka e professora Neyda, por terem dividido seus conhecimentos conosco e por toda paciência. Por ensinarem com tanto cuidado, transparecendo o amor que tem na profissão.

Muito obrigado a todos!

AGRADECIMENTOS

Carolina Ferreira de Abreu

Primeiramente, agradeço a Deus e a todos os seres de luz por terem me acompanhado durante essa etapa da minha vida, sempre me guiando para trilhar o melhor caminho e me concedendo ensinamentos em todos os momentos.

À minha mãezinha e ao meu querido irmão, por serem sempre fontes de amor, companheirismo e apoio. Sem vocês não seria possível alcançar esse tão sonhado objetivo e, principalmente, me tornar a mulher que sou hoje. Tudo por vocês e para vocês.

Ao meu grande amigo Gustavo, parceiro durante toda a graduação e a quem recorri inúmeras vezes para sorrir, chorar e comemorar. Chegar ao final da graduação sem você não seria a mesma coisa. Imensamente grata pela amizade que construímos.

A todos os meus amigos e companheiros que se fizeram presentes durante os altos e baixos desses últimos anos. Todos os momentos com vocês sempre me energizaram e me deram forças para continuar buscando o meu objetivo.

A todos os professores e professoras que já passaram pelo meu caminho até hoje. O conhecimento, dedicação e exemplo de vocês me tornaram uma pessoa mais consciente, questionadora e que valoriza a educação. Que eu possa transmitir o que aprendi com vocês para mais pessoas ao meu redor.

Às minhas queridas orientadoras, professora Yordanka e professora Neyda, pela confiança em aceitar orientar este trabalho e por desempenhar com tanto carinho, paciência e dedicação esse papel.

Gratidão!



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA
ESCOLA DE QUÍMICA



Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Química.

**Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Bagaço de Malte para
Produção de Etanol 2G e Querosene de Aviação**

Carolina Ferreira de Abreu

Gustavo Martins Pereira

Outubro de 2021

Orientadoras: Profa. Yordanka Reyes Cruz, DSc.

Profa. Neyda de la Caridad Om Tapanes, DSc.

Resumo:

O cenário atual de geração e consumo de energia no mundo torna imprescindível a busca por fontes alternativas e renováveis para obtenção desta, visto que é necessária a mitigação dos efeitos negativos causados no planeta pela utilização de fontes energéticas de origem fóssil. Paralelamente, são encontrados no Brasil uma gama de materiais de natureza lignocelulósica que podem ser destinados para este fim. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo apresentar uma análise da viabilidade econômica do uso de bagaço de malte - resíduo da indústria cervejeira que é muito presente no país - como matéria-prima alternativa para produção de dois biocombustíveis de grande interesse comercial e potencial para utilização: etanol de segunda geração e o bioquerosene de aviação. A partir da avaliação de indicadores econômicos como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *Payback* foi possível chegar à conclusão que o investimento em uma planta de produção de bioquerosene é a opção economicamente mais viável, visto que trará maiores ganhos e menos riscos na perspectiva analisada.

Palavras-chave: Bagaço de malte; etanol de segunda geração; bioquerosene; análise econômica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética mundial - Participação por fonte (%) em milhão toneladas equivalentes de petróleo	14
Figura 2: Utilização de energia nos cinco principais países consumidores em milhões de toneladas equivalente de petróleo.....	15
Figura 3: Comparação entre a utilização de fontes renováveis e não renováveis do Brasil, mundo e OCDE.....	16
Figura 4: Produção de biocombustíveis em milhões de toneladas equivalentes de petróleo	18
Figura 5: Número de registros de cervejarias por ano	21
Figura 6: Mapa de símbolos pontuais proporcionais com a distribuição das cervejarias no Brasil por município	21
Figura 7: Diagrama de blocos do processo de hidrólise separada da fermentação (SHF) .	29
Figura 8: Diagrama de blocos do processo de hidrólise e fermentação simultâneas (SSF)	29
Figura 9: Diagrama de blocos do processo de sacarificação e co-fermentação simultâneas (SSCF).....	30
Figura 10: Diagrama de blocos do processo consolidado para a produção de etanol de segunda geração (BPC).....	31
Figura 11: Diagrama de blocos do processo de obtenção de etanol de segunda geração .	38
Figura 12: Diagrama de blocos do processo de obtenção de bioquerosene	40
Figura 13: Comparativo entre o <i>payback</i> simples e descontado das plantas de etanol e bioquerosene	64
Figura 14: Comparativo entre a lucratividade (%) da planta de etanol e bioquerosene	66
Figura 15: Divisão de custos da planta de etanol	68
Figura 16: Divisão de custos da planta de bioquerosene	68

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Composição dos principais constituintes de 4 tipos de BSG de diferentes indústrias cervejeiras **Erro! Indicador não definido.3**
- Tabela 2:** Comparação entre hidrólise com ácido diluído e com ácido concentrado **Erro! Indicador não definido.8**
- Tabela 3:** Principais rotas, matérias-primas e processos utilizados na produção de biocombustíveis **Erro! Indicador não definido.2**
- Tabela 4:** Custo de produção das principais rotas de produção de bioquerosene **Erro! Indicador não definido.4**
- Tabela 5:** Resumo das condições das etapas do processo de obtenção de etanol de segunda geração considerado neste trabalho **Erro! Indicador não definido.8**
- Tabela 6:** Dados de consumo específico de reagentes e insumos e resíduos gerados .. **Erro! Indicador não definido.41**
- Tabela 7:** Premissas adotadas para as variantes tecnológicas da rota BtL-FT **Erro! Indicador não definido.2**
- Tabela 8:** Quantidades obtidas para o balanço de massa global **Erro! Indicador não definido.2**
- Tabela 9:** Premissas monetárias adotadas para os componentes utilizados na obtenção de E2G através da rota química..... **Erro! Indicador não definido.4**
- Tabela 10:** Premissas monetárias adotadas para os componentes utilizados na obtenção de bioquerosene de aviação através da rota BtL-FT **Erro! Indicador não definido.5**
- Tabela 11:** Comparativo das condições e custo da planta referência (Raízen) e da planta em análise **Erro! Indicador não definido.6**
- Tabela 12:** Resumo CAPEX das rotas FT (valores em mil R\$) **Erro! Indicador não definido.7**
- Tabela 13:** Custo energético de cada etapa do processo de obtenção de etanol por tonelada de cana-de-açúcar **Erro! Indicador não definido.8**
- Tabela 14:** Custo energético de cada etapa do processo de obtenção de etanol por litro de etanol **Erro! Indicador não definido.8**
- Tabela 15:** Demanda elétrica de cada etapa do processo de obtenção do bioquerosene **Erro! Indicador não definido.9**

Tabela 16: Dados técnicos da produção de etanol	50
Tabela 17: Dados técnicos da produção de bioquerosene	51
Tabela 18: Dados temporais.....	51
Tabela 19: Dados monetários.....	Erro! Indicador não definido.2
Tabela 20: Quantidade e custos com pessoal, impostos, depreciação e condição de financiamento	Erro! Indicador não definido.3
Tabela 21: Custos das plantas de produção de etanol e bioquerosene	Erro! Indicador não definido.4
Tabela 22: Gasto com utilidades e serviços	Erro! Indicador não definido.4
Tabela 23: Receitas das plantas de produção de etanol e bioquerosene	Erro! Indicador não definido.5
Tabela 24: Tabela de investimentos para as plantas de etanol e bioquerosene	Erro! Indicador não definido.6
Tabela 25: Depreciação referente as máquinas, equipamentos, construções e instalações para planta de etanol	Erro! Indicador não definido.6
Tabela 26: Depreciação referente as máquinas, equipamentos, construções e instalações... para a planta de bioquerosene.....	Erro! Indicador não definido.7
Tabela 27: Dados do financiamento	Erro! Indicador não definido.7
Tabela 28: Detalhamento do pagamento da dívida anual da planta de etanol	Erro! Indicador não definido.8
Tabela 29: Detalhamento do pagamento da dívida anual da planta de bioquerosene	Erro! Indicador não definido.
Tabela 30: Custos fixos das plantas de etanol e bioquerosene no período de 20 anos ..	Erro! Indicador não definido.9
Tabela 31: Custos variáveis referentes a planta de etanol.....	60
Tabela 32: Custos variáveis referentes a planta de bioquerosene.....	60
Tabela 33: Receitas totais da planta de etanol	61
Tabela 34: Receitas totais da planta de bioquerosene	Erro! Indicador não definido.

Tabela 35: Demonstração de resultados (mil R\$/ano) da planta de etanol **Erro! Indicador não definido.**2

Tabela 36: Demonstração de resultados (mil R\$/ano) da planta de bioquerosene **Erro! Indicador não definido.**2

Tabela 37: VPL, TIR e Payback das plantas de etanol e bioquerosene **Erro! Indicador não definido.**3

Tabela 38: Lucratividade (%) ao longo dos anos (1-20) para as plantas de etanol e bioquerosene **Erro! Indicador não definido.**6

Tabela 39: Divisão de custos das plantas de etanol e bioquerosene **Erro! Indicador não definido.**7

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo geral	12
2.2. Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. Panorama geral do consumo de energia	13
3.1.1. Mundo.....	13
3.1.2. Brasil.....	15
3.2. Biocombustíveis	17
3.3. A Indústria Cervejeira no Brasil	20
3.4. Bagaço de malte como resíduo e sua composição estrutural	22
3.5. Processo de obtenção de Etanol 2G	23
3.5.1. Pré-tratamento.....	24

3.5.2.	Hidrólise.....	27
3.5.3.	Fermentação.....	28
3.6.	Processo de obtenção de Bioquerosene.....	31
4.	METODOLOGIA.....	35
4.1.	Condições selecionadas para a avaliação econômica dos processos	35
4.2.	Obtenção de Etanol de Segunda Geração (E2G).....	34
4.3.	Obtenção de Bioquerosene de Aviação	39
4.4.	Dados quantitativos utilizados na avaliação econômica.....	40
4.4.1.	Balanço de massa do processo de obtenção de E2G por rota química	41
4.4.2.	Balanço de massa do processo de obtenção de bioquerosene a partir da rota de Fischer-Tropsch.....	42
4.5.	Premissas monetárias consideradas na avaliação econômica	43
4.5.1.	Custos com reagentes e insumos.....	43
4.5.1.1.	Etanol de segunda geração.....	43
4.5.1.2.	Bioquerosene	44
4.5.2.	Despesas de capital (CAPEX)	45
4.5.2.1.	Etanol de segunda geração.....	45
4.5.2.2.	Bioquerosene	46
4.5.3.	Gastos energéticos.....	47
4.5.3.1.	Etanol de segunda geração.....	47
4.5.3.2.	Bioquerosene	49
4.5.4.	Premissas para dimensionamento da planta.....	49
5.	CÁLCULOS E RESULTADOS OBTIDOS	54
5.1.	Custos	54
5.2.	Receitas	55
5.3.	Investimentos	55
5.3.1.	Depreciação.....	56
5.3.2.	Financiamento	57

5.3.3. Pagamento da dívida	57
5.4. Projetos – Receitas e Custos totais	59
5.4.1. Custos totais	59
5.4.2. Receitas totais	61
5.5. Demonstração de resultados	61
5.6. Indicadores financeiros	62
5.7. Lucratividade	65
5.8. Divisão de custos	67
6. CONCLUSÃO	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da população mundial e a crescente necessidade de fontes energéticas para suprir a demanda, além das reservas limitadas e dos impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis, a busca por fontes de energia renovável tem se tornado uma das principais alternativas frente a esse cenário.

O grande desafio desse tipo de combustíveis é a obtenção de uma tecnologia que seja economicamente viável, pois grande parte apresenta baixa competitividade frente aos combustíveis fósseis, que ainda possuem um valor baixo de produção e comercialização (SILVA, 2009).

A busca por biocombustíveis levou primeiramente à geração de combustíveis como o etanol de primeira geração, obtido pela fermentação de açúcares extraídos de matérias-primas como a cana de açúcar, o milho e a beterraba (OGEDA e PETRI, 2010). Porém, esse tipo de matéria-prima compete com a indústria alimentícia e também tem a necessidade de maior área de plantio para aumento da produção. Então, outra via para a produção de etanol surgiu, utilizando como matéria-prima os resíduos de natureza lignocelulósica, que são destinados principalmente à queima em caldeiras ou depositados em áreas inapropriadas (OLIVEIRA, 2017).

Outros setores também necessitam da produção de biocombustíveis para alcançar objetivos específicos, como a indústria de aviação, que visa reduzir as contribuições do setor para as mudanças climáticas globais. Portanto, os membros da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), se comprometeram, em 2009, com a redução de emissões de gases do efeito estufa (IATA, 2013). Para alcançar tais metas, a associação estabeleceu uma estratégia baseada em quatro melhorias: nas tecnologias para fuselagem e motores, uso de biocombustíveis, eficiência em operações de voos, melhorias do espaço e infraestrutura aérea, e o uso de instrumentos econômicos (VILT, 2018).

Os materiais lignocelulósicos são oriundos de resíduos da agroindústria e de atividades da exploração florestal, sendo também o recurso orgânico mais abundante do mundo, representando a maior porção do carbono total fixado por fotossíntese. Como principais exemplos, destacam-se: o bagaço de cana de açúcar, o sabugo de milho, a palha de arroz, a palha de trigo, a casca de aveia e as aparas de eucalipto (ARISTIDOU e PENTTILA, 2000).

Uma das indústrias mais representativas no Brasil é o setor alimentício, que representou um faturamento de R\$ 789,2 bilhões em 2020, somadas as exportações e as vendas para o mercado interno, resultado 12,8% superior ao registrado no ano de 2019. O montante representa cerca de 10,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (Associação Brasileira da Indústria de Alimentos - ABIA).

Dentre essas indústrias, o setor cervejeiro é responsável por 1,6% do PIB nacional, com arrecadamento de 21 bilhões de reais de impostos ao ano. No total, o país possui 1.209 cervejarias registradas. É um mercado que em vinte anos cresceu 19%, sendo que nos últimos 5 anos, a taxa de crescimento médio é de 36% (Anuário da Cerveja, 2019 - CervBrasil).

Em comparação com os outros países do mundo, o Brasil ocupa a terceira posição no ranking de maiores produtores de cerveja, ficando atrás apenas da China e dos Estados Unidos (*Kirin Global Beer Report*, 2018).

O principal resíduo da indústria cervejeira é o bagaço de malte ou BSG (do inglês "*brewer's spent grain*"), gerado na etapa de mosturação, que corresponde a 85% de todos os resíduos gerados na produção (REINOLD, 1997). Esse bagaço é constituído basicamente das cascas da semente de cevada malteada, e se encontra disponível durante todo ano, em grandes quantidades e a um baixo custo (MUSSATTO et al., 2004). Na maioria das vezes é destinado para produção de ração animal. Porém, ele pode ser considerado uma alternativa para o setor energético para a produção de biocombustíveis líquidos de segunda geração. Além de inovadora, a utilização dessa biomassa resultante do processo cervejeiro pode trazer benefícios econômicos para a indústria e para o país no que se refere à produção de energia limpa e diminuição da emissão de gases de efeito estufa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica da produção de etanol de segunda geração e de bioquerosene de aviação obtidos através do bagaço de malte, definindo o processo mais rentável/sustentável para destino desse resíduo.

2.2. Objetivos específicos

- Definir a rota preferencial para a produção de etanol de segunda geração, utilizando como matéria-prima o bagaço de malte;
- Definir a rota preferencial para a produção da bioquerosene, utilizando como matéria-prima o bagaço de malte;
- Calcular gastos inerentes aos processos escolhidos, dos materiais e reagentes necessários e o valor do produto final obtido;
- Verificar se os processos são economicamente viáveis e definir a melhor alternativa para o resíduo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Panorama geral do consumo de energia

3.1.1. Mundo

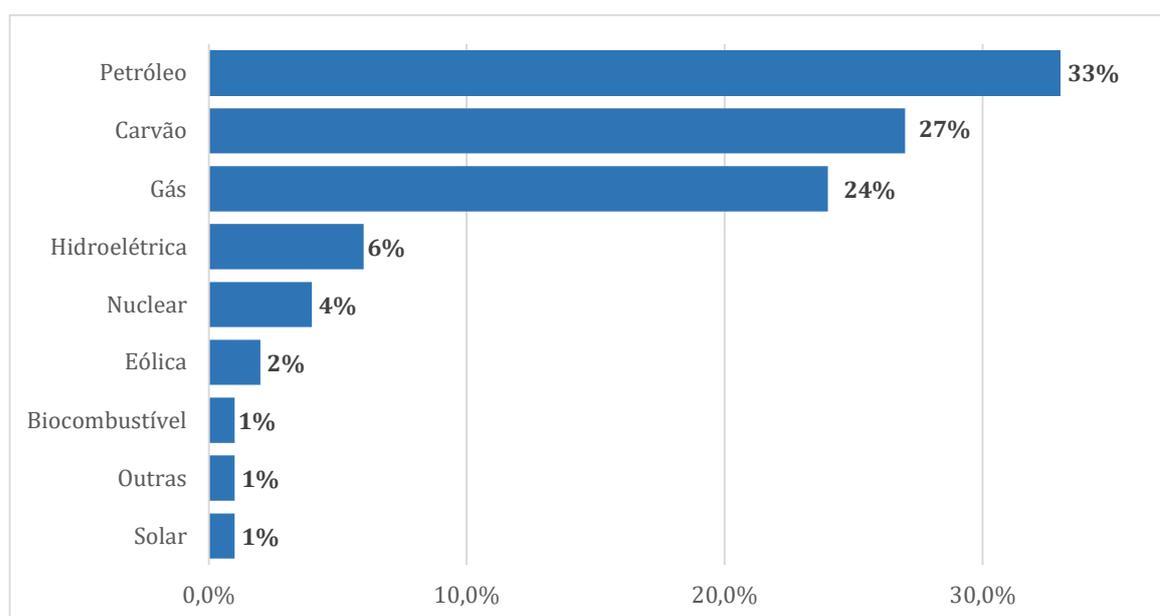
Com o passar dos anos, a demanda mundial por energia cresce em velocidades cada vez maiores. Esse fenômeno está associado não só ao desenvolvimento tecnológico, mas também a questões sociais como a redução da pobreza, crescimento populacional e urbanização (DEMIRBAS, 2017). Como um indicativo desse cenário, no ano de 2017, registrou-se um aumento de 2,2% na demanda global por energia, número acima da média observada nos dez anos anteriores (*BP Statistical Review of World Energy*, 2018).

Essa demanda de energia atualmente é sustentada pela matriz energética mundial, que é composta por recursos renováveis e não renováveis. Os recursos renováveis são aqueles considerados inesgotáveis e/ou capazes de se renovarem naturalmente ou com ajuda humana. Exemplos deles são a biomassa, a água, o vento, entre outros. Já os recursos não renováveis são limitados e dentre eles estão o petróleo e seus derivados. Apesar da existência de fontes renováveis, o consumo de energia através de fontes energéticas não renováveis ainda se destaca no mundo.

Se tratando de geração de energia elétrica, o consumo de fontes não renováveis para este fim se deu em torno de 72,6% nos países que compõe a Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) no mundo no ano de 2018 (IEA – *Key electricity trends*, 2018).

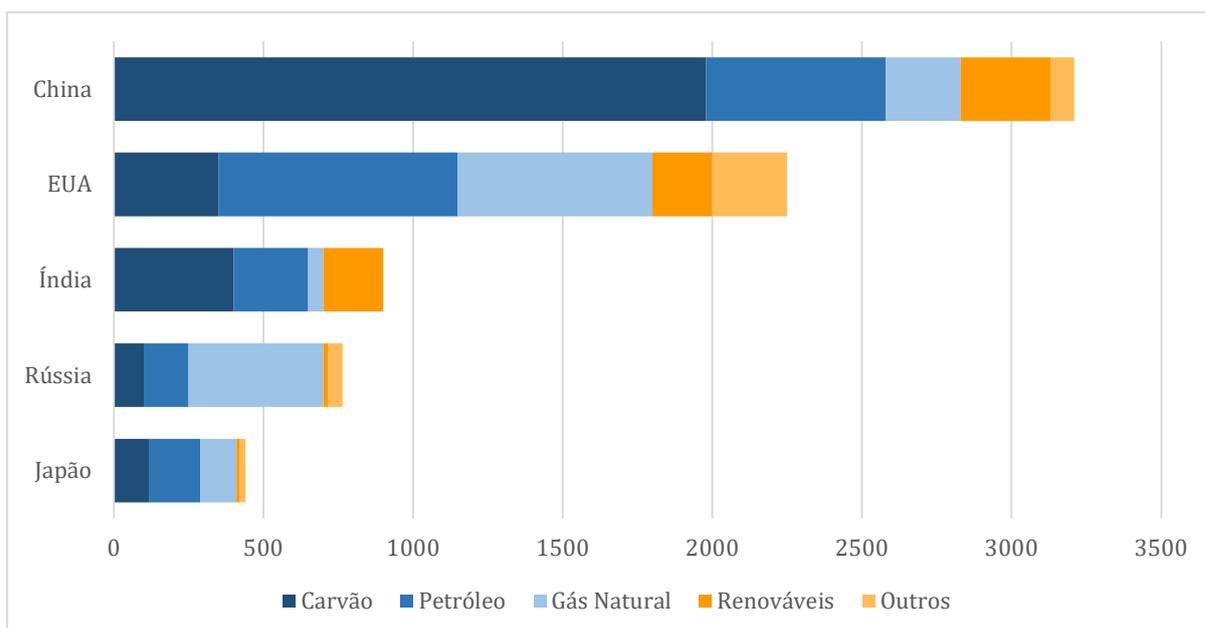
As principais fontes de energia não renováveis utilizadas são o petróleo, o carvão e o gás natural. Apesar do aumento na utilização de formas renováveis de obtenção de energia, essas três fontes ainda estão entre as mais utilizadas no planeta, trazendo como consequência altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera. Segundo relatório anual da *British-Petroleum*, no ano de 2019 o petróleo teve uma participação de 33% na matriz energética mundial, seguido pelo carvão e gás natural com parcelas de 27% e 24%, respectivamente, conforme demonstrado a seguir na Figura 1.

Figura 1: Matriz energética mundial - Participação por fonte (%) em milhão toneladas equivalentes de petróleo – Fonte: Elaboração própria a partir de FGV Energia, BP Statistical Review 2020



Em análise realizada pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA), no ano de 2018 os cinco principais países que mais utilizaram energia no mundo foram: República Popular da China, Estado Unidos da América, Índia, Rússia e Japão. A Figura 2 mostra que fontes de energia renovável ainda ocupam pouco espaço na matriz energética de tais países. Além disso, a presença de carvão, petróleo e gás natural conversam com os dados apresentados na figura fornecido pela BP no ano seguinte.

Figura 2: Utilização de energia nos cinco principais países consumidores em milhões de toneladas equivalente de petróleo – Fonte: Elaboração própria a partir de IEA, 2018



Apesar da conjuntura mundial em relação ao consumo de fontes esgotáveis, a substituição do uso de fontes fósseis por fontes renováveis para obtenção de energia é pauta mundial há mais de 20 anos. Essa transição visa a redução na emissão de gases de efeito estufa (GEE) que afeta tão gravemente o planeta Terra. E, para alcançar esse objetivo, podem ser citados dois marcos históricos no que se refere a preservação ambiental: a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO 92) na cidade do Rio de Janeiro em 1992 e a criação de um tratado internacional que tinha como finalidade alertar o mundo sobre o efeito estufa e o aquecimento global. Esse tratado é conhecido como Protocolo de Kyoto e foi assinado por diversos países, incluindo o Brasil, no ano de 1997. Esses países assumiram o compromisso de seguir diretrizes que visassem a redução dos impactos ambientais causados, em grande parte, pelo grande volume de dióxido de carbono lançado na atmosfera.

3.1.2. Brasil

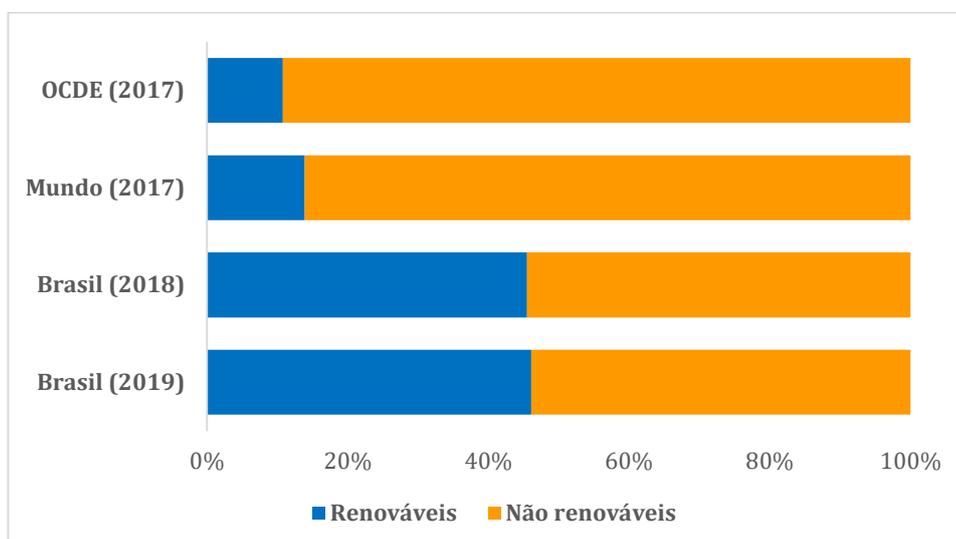
Ao se tratar da matriz energética brasileira, o cenário é consideravelmente diferente do que é observado no mundo. Isso porque, apesar de o Brasil ainda fazer uso de fontes não renováveis, as fontes renováveis ocupam um lugar de maior

destaque na produção e consumo energético brasileiro. Segundo dados publicados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no ano de 2020, a utilização de fontes inesgotáveis na matriz energética brasileira supera a utilização destas fontes na matriz energética mundial.

Nesse contexto, por possuir uma grande extensão territorial com bacias hidrográficas localizadas em locais que favorecem o aproveitamento hidráulico, um clima tropical que faz com que na maior parte do ano haja disponibilidade de luz solar e a alta umidade que propicia a grande oferta de biomassa, oriunda da produção agrícola e/ou de resíduos vegetais, o Brasil dispõe de condições naturais favoráveis para investir em energia renovável. Além disso, políticas públicas como o Programa Brasileiro do Álcool Combustível (Pró-Álcool, 1976) e o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB, 2004) possibilitaram ainda mais o desenvolvimento de novas formas de obtenção de energia.

Segundo o relatório síntese sobre o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020 (ano base 2019), o Brasil possui 46,1% de fontes renováveis em sua matriz energética, muito à frente do cenário mundial do ano de 2017, conforme demonstrado na Figura 3.. Essa parcela é composta por 18% de biomassa de cana de açúcar, 12,4% de fontes hidráulicas, 8,7% de lenha e carvão vegetal e os 7,0% finais são oriundos de outras fontes renováveis como biodiesel, biogás e outras biomassas. Vale ressaltar que em relação a matriz elétrica brasileira, as fontes renováveis têm participação ainda maior (83,0%).

Figura 3: Comparação entre a utilização de fontes renováveis e não renováveis do Brasil, mundo e OCDE - Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2020



Além disso, convém frisar que o setor de transportes é um dos setores que mais consomem energia no país. Nesse mesmo ano avaliado, o consumo foi de 32,7%, o maior dentre todos os outros setores e superando o consumo da indústria em 2,3%. Já o setor de geração de energia elétrica e o consumo nas residências vieram em terceiro e quarto lugar com 11,2% e 10,3%, respectivamente. Esses dados indicam a relevância do estabelecimento de novas tecnologias e incentivos para a utilização de biocombustíveis na área de transportes, já que a mesma é responsável por uma fatia considerável do consumo total e possui um grande potencial para redução desse gasto e oportunidades tecnológicas para adoção de consumo mais limpo e sustentável.

Devido à alta demanda por energia e a importância de mitigar os problemas ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis, há alguns anos vêm sendo estudadas alternativas de produção de energia para serem utilizadas nos mais diferentes setores de consumo e que impactem menos ao meio ambiente. Dentre as possibilidades estudadas e aplicadas hoje estão a obtenção de energia através da luz solar (fotovoltaica), vento (eólica), água (hidrelétricas) e dos biocombustíveis.

3.2. Biocombustíveis

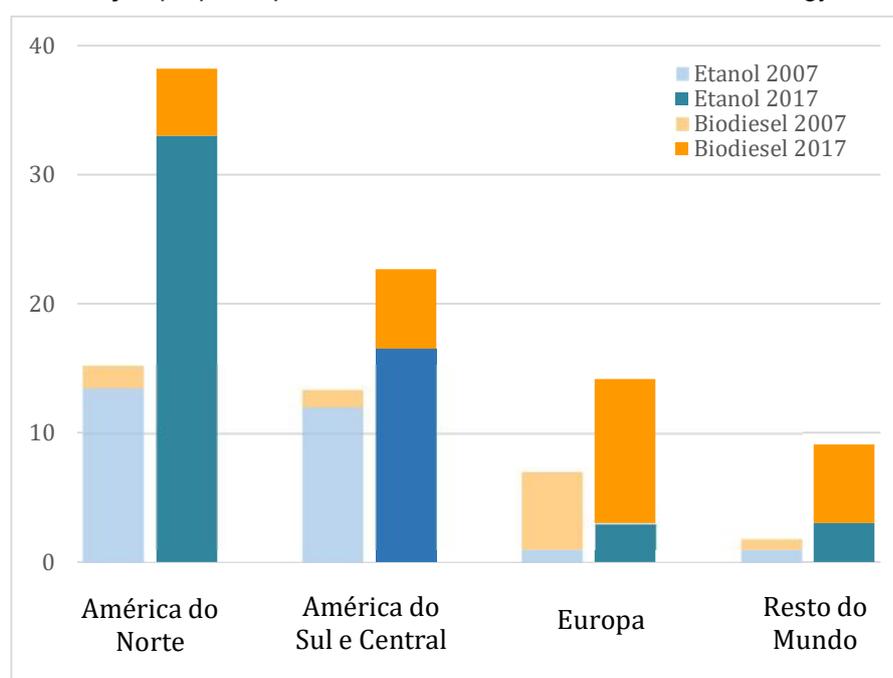
Os biocombustíveis são combustíveis oriundos de matérias agrícolas como plantas oleaginosas - soja, dendê, mamona, entre outras - ou biomassas florestais. A economia global voltada para a geração de biocombustíveis foi iniciada com a utilização de grãos, cana-de-açúcar e óleos vegetais como matéria-prima e a esses biocombustíveis foi dada a classificação de primeira geração (1G). Entretanto, devido à competição entre o setor energético e o de alimentos, os biocombustíveis começaram a ser produzidos a partir de resíduos florestais agrícolas e coprodutos, conhecidos como resíduos lignocelulósicos. Os combustíveis obtidos a partir dessas fontes são ditos biocombustíveis de segunda geração (2G) (MOHR e RAMAN, 2013).

Hoje, dentre os biocombustíveis que possuem maior destaque estão o etanol e o biodiesel. O primeiro é comumente produzido da cana-de-açúcar ou do milho e é bastante utilizado em veículos como automóveis e motocicletas. Já o segundo, é produzido a partir de gordura animal ou óleos vegetais e utilizado, principalmente, em veículos pesados como caminhões e ônibus. Além deles, outro biocombustível que possui potencial, mas que não tem avançado em termos de utilização é o

bioquerosene. Sua aplicação, que está muito associada ao mercado de aviação, ainda apresenta limitações. Segundo Pedro Scorza, diretor de Biocombustíveis para Aviação da União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (Ubrabio), o problema para a baixa utilização deste biocombustível é mercadológico. O custo do bioquerosene final não é competitivo com o obtido a partir de fonte fóssil. Sabendo disso e que o uso de querosene corresponde a uma grande parcela dos custos das companhias de aviação, é necessário estimular o desenvolvimento de novas tecnologias para aumento de escala da produção desse recurso.

Segundo a *BP Statistical Review of World Energy* publicada em 2018, a produção mundial de biocombustíveis aumentou cerca de 3,5% no ano de 2017. Dentre os países que mais se destacaram em relação à produção de biocombustíveis no ano analisado, os Estados Unidos produziram cerca de 43,9% do volume total gerado a nível mundial, seguido do Brasil com 21,95% e Alemanha com 3,91%. Em relação ao tipo de biocombustível, etanol e biodiesel foram os que mais contribuíram para esses números e mostraram um considerável aumento em comparação ao ano de 2007. Destaque para o volume de etanol nos países da América do Norte e Biodiesel nos países das Américas do Sul e Central, como detalhado na Figura 4.

Figura 4: Produção de biocombustíveis em milhões de toneladas equivalentes de petróleo - Fonte: Elaboração própria a partir de BP Statistical Review of World Energy, 2018



Em relação à produção de etanol, biocombustível mais produzido no mundo, algumas ponderações a respeito dos aspectos econômicos e tecnológicos podem ser feitas comparando a produção desse biocombustível de primeira (E1G) e segunda geração (E2G). Em relação às características de produto final, o etanol de ambas as gerações é equivalente. Consequentemente, ambos combustíveis desfrutam das mesmas vantagens do mercado em crescimento e da demanda. Apesar disso, os dois possuem custos produtivos diferenciados, sendo a produção de um litro de E1G ligeiramente mais barata do que a mesma quantidade do E2G. Esse aspecto pode estar associado às diferenças entre a tecnologia utilizada para a produção, visto que a tecnologia utilizada para obtenção do E2G é mais complexa, e há a necessidade de maior quantidade de mão de obra especializada para a sua produção (SENNA, 2016).

Apesar das limitações apresentadas, a utilização de biomassas lignocelulósicas para obtenção de biocombustíveis de segunda geração ainda é prioridade (HO et al., 2014) e precisa continuar em desenvolvimento para tornar mais acessível e economicamente viável a sua utilização. O aumento do interesse na utilização de matérias-primas de segunda geração para produção de biocombustíveis também pode ser relacionado ao fato de que, enquanto os classificados como primeira geração reduzem a emissão de CO₂ em cerca de 60% quando comparado à gasolina, a redução da emissão pode chegar a 90% na utilização dos biocombustíveis de segunda geração (Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE)). Além disso, há vantagens logísticas ligadas à sua utilização, já que os insumos necessários para a produção dos biocombustíveis de segunda geração são sub ou coprodutos da produção dos classificados como primeira geração e, por isso, já se encontrariam na própria unidade de produção.

As pesquisas para utilização de diferentes tipos de biomassas na produção de biocombustíveis líquidos crescem com o passar dos anos devido à necessidade de novas rotas sintéticas e tecnológicas. Hoje, a utilização de microalgas e bagaços oriundos de diferentes materiais vegetais são os que mais se destacam em razão da disponibilidade de tais insumos. No caso dos bagaços, esses podem ser provenientes da cana-de-açúcar, sorgo, milho, malte de cevada, entre outros. A indústria de alimentos e bens de consumo possuem um papel fundamental no desenvolvimento desses biocombustíveis, podendo contribuir não só com a matéria-

prima necessária para a produção, que muitas vezes é resíduo da sua manufatura, mas também no apoio à pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

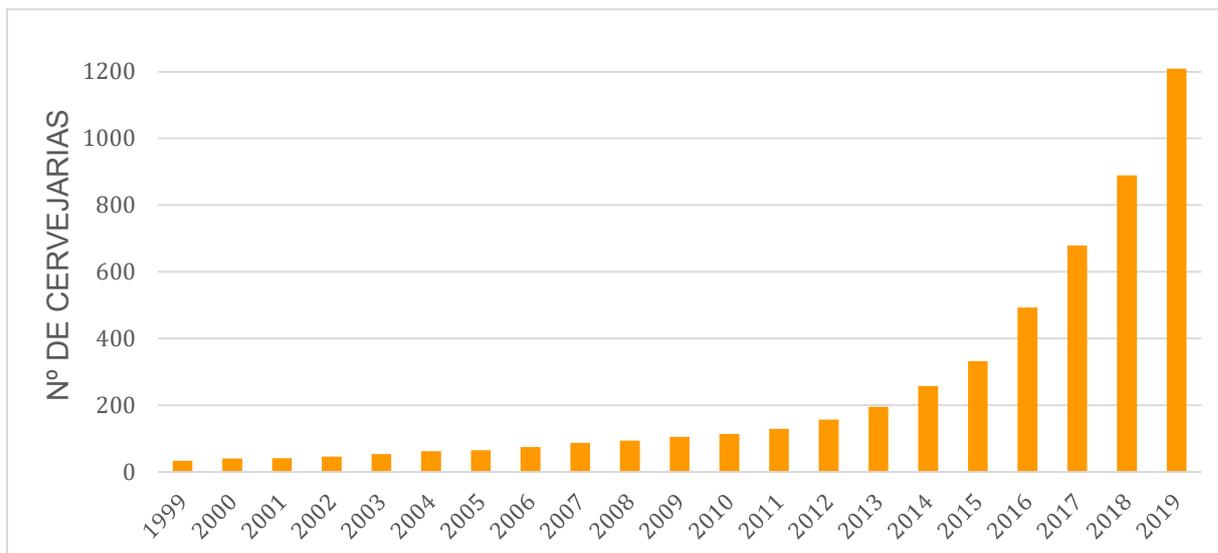
Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (ABIA) em seu balanço publicado no ano de 2020, a indústria brasileira de alimentos e bebidas processa 58% de toda produção agropecuária do país. Com isso, esse setor também é responsável por grande parte dos resíduos vegetais gerados e que possuem potencial de reaproveitamento para geração de produtos com maior valor agregado. A indústria cervejeira está fortemente presente no Brasil e pode não só ser uma grande contribuidora para o avanço no desenvolvimento de energia limpa, como também pode tirar vantagens econômicas desse cenário.

3.3. A Indústria Cervejeira no Brasil

A produção de cervejas no Brasil iniciou-se de maneira artesanal por volta do ano de 1830 e tinha como finalidade o consumo próprio, já que a importação desse líquido se tornou praticamente impossível devido aos altos preços. Essa forma de produção durou até 1850, quando pequenas cervejarias foram surgindo em território nacional, sendo a Cervejaria Bohemia pioneira (1853), seguida da criação da Cervejaria Brahma (1888) e Antártica (1889) (Instituto da Cerveja, 2017).

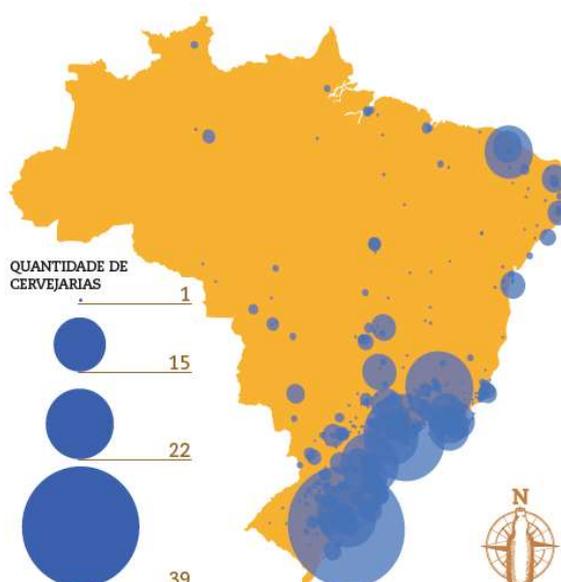
Desde então, a produção de cervejas no Brasil foi ganhando espaço e o número de cervejarias, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte, foi crescendo. Segundo o Anuário da Cerveja, publicado no ano de 2020 pelo Ministério da Agricultura - Pecuária e Abastecimento (MAPA), foram registradas junto ao ministério o total de 1209 cervejarias no país. Durante os últimos vinte anos houve um aumento médio de quase 20% ao ano. Do total do último registro, 320 unidades foram criadas entre os anos de 2018 e 2019, mostrando o quanto este é um mercado em expansão no país, conforme exemplificado na Figura 5.

Figura 5: Número de registros de cervejarias por ano – Fonte: Elaboração própria a partir de Anuário da Cerveja - MAPA, 2020



Além disso, pode-se destacar também a presença acentuada dessas cervejarias nas regiões sul e sudeste do país. Cerca de 80% dos estabelecimentos registrados ficam localizados nessa região, fato que pode ser associado não apenas a grande concentração de consumidores da bebida fermentada, mas também pela forte presença da produção de cereais. Ainda seguindo essa análise, pode-se dizer que a localização das cervejarias no país é desigual e pode ser considerada uma oportunidade para crescimento, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6: Mapa de símbolos pontuais proporcionais com a distribuição das cervejarias no Brasil por município – Fonte: Anuário da Cerveja, MAPA, 2020



Junto ao aumento do número de estabelecimentos cervejeiros, cresce também a quantidade de resíduos sólidos gerados por essas indústrias. Dentre eles, o bagaço de cevada – também chamado de bagaço de malte – corresponde a 85% do total de subprodutos produzidos (COSTA et al., 2006). Por possuir um grande potencial para ser utilizado como ingrediente nas rações animais, hoje o destino desse material para cervejarias como a Ambev é a alimentação animal. Sendo esse bagaço vendido úmido ou seco, onde a segunda opção é a que possui maior valor agregado.

Associando à grande demanda por energia no país, uma alternativa para o setor energético é a utilização desse resíduo volumoso da indústria cervejeira como matéria-prima para a produção de biocombustíveis líquidos. Além de inovadora, a utilização dessa biomassa resultante do processo cervejeiro poderá trazer benefícios econômicos para a indústria e para o país no que se refere à produção de energia limpa e diminuição da emissão de gases de efeito estufa.

3.4. Bagaço de Malte como resíduo e sua composição estrutural

O bagaço de malte é o principal subproduto resultante do processo de fabricação de cervejas, sendo gerado de 14-20 kg a cada 100 litros de cerveja produzida, o que corresponde a 85% do total de subprodutos. Segundo relatório anual da Ambev, no ano de 2020 foram produzidos cerca de 84 milhões de hectolitros e, conseqüentemente, foram gerados mais de 1,27 milhões de toneladas de bagaço de malte. Apesar da grande quantidade gerada e baixo custo, seu uso ainda é limitado, sendo destinado principalmente para ração animal (TANG et al., 2009).

Esse resíduo consiste basicamente na casca do grão de cevada, obtida após a preparação do mosto. Por isso, sua composição pode variar de acordo com o tipo de cevada utilizada na produção, época de colheita, condições de maltagem e mosturação e a qualidade e tipo de aditivos no processo de fermentação (MUSSATO e ROBERTO, 2006).

Os principais constituintes desse subproduto são as partes insolúveis do malte, assim como cascas, farelos e resíduos de endosperma da semente germinada. (OHRA-AHO et al., 2016). É uma biomassa lignocelulósica, que possui como principais constituintes: lignina, celulose, hemicelulose e proteínas. A Tabela 1 a seguir foi obtida na literatura, onde foram analisadas quatro amostras de bagaço de malte de diferentes cervejarias.

Tabela 1: Composição dos principais constituintes de 4 tipos de BSG de diferentes indústrias cervejeiras – Fonte: Elaboração própria a partir de BOUGRIER et al, 2018

%	BSG ¹	BSG ²	BSG ³	BSG ⁴
Lignina	11,9	7,9	5,1	5,9
Celulose	21,8	23,8	20,0	17,4
Hemicelulose	29,9	30,8	38,7	36,3
Proteínas	24,0	25,0	24,0	25,0

Devido a sua composição, o bagaço de malte tem grande potencial para ser uma matéria-prima com baixo preço para produção de etanol, devido à alta porcentagem de açúcares fermentáveis e nitrogênio, não necessitando de adição de outros nutrientes (PINHEIRO et al., 2019).

Uma das grandes desvantagens quando comparamos as biorrefinarias frente às refinarias de petróleo, se deve ao fato da disponibilidade sazonal de diversas biomassas. A vantagem do bagaço de malte é a produção contínua, de larga escala e sem regionalização de indústrias (MENON e RAO, 2012).

3.5. Processo de obtenção de Etanol 2G

O etanol, também chamado de álcool etílico, é um composto orgânico de fórmula molecular C_2H_5OH , produzido desde os tempos antigos pela fermentação dos açúcares encontrados em produtos vegetais como a cana-de-açúcar, beterraba e cereais. Atualmente, grande parte do etanol é produzido por meio da fermentação, embora também seja feito de forma sintética através do eteno derivado do petróleo (BASTOS, 2017).

A produção do etanol de segunda geração possui, no geral, quatro principais etapas: pré-tratamento da biomassa, hidrólise, fermentação e separação pelo processo de destilação. Esses processos podem acontecer de formas separadas ou concomitantes.

3.5.1. Pré-tratamento

Os materiais lignocelulósicos são formados majoritariamente por celulose e hemicelulose, que são os polissacarídeos, ligados por ligações covalentes e de hidrogênio com a lignina, formada por álcoois aromáticos (LEE, 1997). Internamente, as fibrilas da fração celulósica encontram-se dispostas como espirais, de forma a conferir força e flexibilidade ao material. Esta fração encontra-se envolvida pela lignina, cuja função é aumentar a resistência da estrutura a ataques químicos e enzimáticos. A terceira e última fração principal, a hemicelulose, atua como um elo químico entre a celulose e a lignina. Estas características resultam em materiais flexíveis, porém altamente resistentes a espécies químicas (CASTRO, 2010).

Então, o pré-tratamento visa aumentar a área superficial da celulose e reduzir sua cristalinidade, pois sem essa etapa, o rendimento do processo estaria comprometido devido às características estruturais da biomassa (HAMELINCK et al., 2005). O pré-tratamento pode ser físico, químico, biológico, ou até mesmo uma combinação entre esses métodos. As condições do processo variam de acordo com o tipo de matéria-prima, o rendimento e a integridade dos produtos de interesse (GALBE e ZACHI, 2002).

Geralmente, a primeira etapa utilizada é o pré-tratamento físico, visando aumentar a acessibilidade à celulose por meio de mudanças na estrutura da biomassa como o aumento da área superficial, desfibrilação e algumas vezes a redução do grau de polimerização e da cristalização, sem alterar sua composição química (ALVIRA et al., 2010). Utilizando esse tipo de pré-tratamento, evita-se alguns problemas como a formação de inibidores, a necessidade de lavagem e neutralização do material pré-tratado, além de ser facilitado pelo baixo tempo de residência e uso de temperaturas moderadas (MORO et al., 2017).

Entre os tipos mais comuns, podemos citar: moagem, extrusão, radiação de micro-ondas e congelamento, entre outros. A partir da fragmentação mecânica, o tamanho da biomassa lignocelulósica é diminuído e isso pode ser feito por uma combinação de lascagem, trituração e moagem. O tamanho dos materiais são, normalmente, de 10 a 30 mm após o lascamento e de 0,2 a 2 mm após a moagem ou trituração (CHENG e SUNG, 2002). Esses processos físicos são comumente utilizados em conjunto com outros processos, devido a sua baixa efetividade quando é o único tipo de pré-tratamento usado (MOOD et al., 2013). O pré-tratamento físico

para biomassa mais estudado é o processo de moagem, principalmente utilizando o moinho de bolas e o moinho de discos (SILVA et al., 2013).

A moagem de bolas consiste no cisalhamento mecânico em um tambor rotatório com bolas de diferentes tamanhos que podem ser feitas de diversos materiais (tungstênio, cerâmica ou aço inoxidável), e pode ser feito no estado úmido ou seco. O efeito da moagem de bolas no tamanho da partícula de biomassa, estrutura e grau cristalino depende da velocidade de rotação, tempo de operação e tamanho da bola (SILVA et al., 2013). O cisalhamento gerado entre as esferas devido à rotação do tambor é responsável pela redução do tamanho das partículas e da cristalinidade, aumentando a sacarificação da celulose (SILVA et al., 2012). A celulose altamente cristalina tem uma forte estrutura de ligação de hidrogênio entre as cadeias, que confere uma alta resistência à hidrólise, enquanto a celulose amorfa é mais facilmente sacarificada (NISHIYAMA et al., 2002). Entre suas principais vantagens, destaca-se a manutenção da composição química do material não tratado e também o fato de não haver geração de frações líquidas, gases ou inibidores. No entanto, os processos de moagem são conhecidos por possuírem um alto consumo de energia, dependendo das características do material e do tamanho da partícula desejada ao fim do processo (AGUIAR e RIBEIRO, 2017).

A moagem úmida com discos (*wet disk milling*) é um tipo de triturador que pode ser usado para moer, cortar ou cisalhar a biomassa. Em geral, o material em suspensão é alimentado entre os discos ou placas, que podem ser ranhuradas, serrilhadas ou pontiagudas (SILVA et al., 2013). A força aplicada no material vai depender do tipo de disco, a distância entre os discos e sua velocidade de rotação. O processo pode ser repetido de acordo com o tamanho de partícula necessário (ENDO et al., 2008). Apesar de apresentarem rendimentos menores que a moagem em moinho de bolas, a moagem de discos apresenta menor consumo energético dentre as demais (HIDENO et al., 2008).

Dos vários processos descritos na literatura, os pré-tratamentos químicos são os mais utilizados, e são baseados no emprego de ácidos ou bases associados à temperatura, com o propósito de degradar a estrutura associativa da lignocelulose (BRODEUR et al., 2011). As diferenças entre estes dois tipos de pré-tratamentos estão relacionadas aos agentes químicos utilizados e aos mecanismos responsáveis pelas modificações estruturais e químicas da parede celular (SILVA et al., 2014).

Os pré-tratamentos catalisados por ácidos têm sido amplamente utilizados e são considerados um dos mais efetivos, além de economicamente viáveis (PANDEY et al., 2000). Como reagentes, podem ser utilizados ácidos concentrados ou diluídos. Então, há uma diversidade de espécies utilizadas, onde os ácidos clorídrico e sulfúrico têm sido os mais utilizados devido à sua alta eficiência (CARDONA et al., 2010). Outros ácidos também podem ser utilizados, como os ácidos nítrico, fosfórico, peracético e oxálico (SINGH et al., 2015).

Os processos que envolvem ácidos concentrados são operados em baixas temperaturas e produzem maiores rendimentos, porém as grandes quantidades de ácidos usados causam problemas, como formação de inibidores, corrosão dos equipamentos, alto custo de operação e manutenção (BEHERA et al., 2014). Além das desvantagens já citadas, o tratamento ácido requer uma etapa adicional para neutralizar a biomassa ao final do processo e eliminar os inibidores formados (SILVA et al., 2013). Se o processo for feito utilizando ácido diluído, são necessárias maiores temperaturas para melhorar a eficiência da reação, devido à elevada cristalinidade dos polissacarídeos (GROSSI, 2015).

Inicialmente, a primeira etapa ácida promove a hidrólise da hemicelulose e outros polissacarídeos a monossacarídeos, como xilose, manose, galactose, glicose, entre outros. Como a hemicelulose é constituída principalmente de xilana, o principal produto do tratamento ácido é a xilose (CAMARGO e RODRIGUES, 2008). A remoção da fração hemicelulósica torna a celulose mais acessível o que, geralmente, resulta em elevados rendimentos de hidrólise para este pré-tratamento (BALAT et al., 2007).

Em seguida, usa-se o pré-tratamento básico, para remover a fração de lignina, para finalmente expor a celulose para posterior hidrólise (MOOD et al., 2013). Há a destruição da estrutura rígida da lignina através da base, aumentando a porosidade da celulose e reduzindo seu grau de polimerização e cristalinidade (ZHANG et al., 2012). As bases mais empregadas são hidróxido de sódio, hidróxido de cálcio, uréia e amônia, sendo o hidróxido de sódio diluído o mais utilizado e também mais vantajoso devido a seu baixo custo e fácil acesso. O tratamento básico tem a vantagem de requerer condições de temperatura e pressão amenas e a degradação dos açúcares é menos intensa comparada com o tratamento ácido (ZHANG et al., 2012). Porém, esse tipo de pré-tratamento requer um longo tempo de residência,

podendo ser de horas e até dias, e necessitam de neutralização da lama formada ao final do processo (MOOD et al., 2013).

3.5.2. Hidrólise

A etapa de hidrólise consiste em expor a celulose a um produto químico, em uma dada temperatura, e por um período de tempo específico, para se obter monômeros de açúcar a partir dos polímeros presentes após o pré-tratamento (TAHERZADEH e KARIMI, 2007). A hidrólise ácida tem o ácido sulfúrico como o catalisador mais utilizado, embora quando necessários ácidos minerais fortes, outros como o ácido clorídrico, o ácido nítrico e os ácidos trifluoracéticos (TFA) possam ser utilizados. Para o processo com ácidos diluídos, utilizam-se ácido fosfórico e também ácidos orgânicos fracos (GÍRIO et al., 2010).

Durante o pré-tratamento, boa parte da camada de hemicelulose é hidrolisada, então na etapa de hidrólise, temperaturas mais elevadas são aplicadas a fim de intensificar a quebra da celulose. O catalisador ácido utilizado age de maneira rápida na conversão da celulose em hexoses e, portanto, a reação deve ser controlada para evitar a formação de produtos indesejáveis e inibidores do processo. (GURGEL, 2010). A concentração do ácido é um fator importante na reação, pois quando esta concentração é elevada, a conversão da celulose ocorre de maneira mais rápida (NEUREITER et al., 2002). A hemicelulose geralmente é muito mais suscetível à hidrólise ácida do que a celulose, e a taxa de conversão em condições relativamente amenas pode chegar a 85%, sendo que apenas uma pequena parte de celulose é convertida em glicose nessas condições. Então, para se otimizar a taxa de conversão, a etapa de hidrólise da celulose é feita em condições mais severas, com incremento na pressão e temperatura (XIANG, 2002).

A Tabela 2 faz uma comparação entre as características da hidrólise com ácido diluído e da hidrólise com ácido concentrado.

Tabela 2: Comparação entre hidrólise com ácido diluído e com ácido concentrado – Fonte: Elaboração própria a partir de MARTINS, 2018

	Hidrólise com ácido diluído	Hidrólise com ácido concentrado	Fonte
Consumo de ácido	Menor	Maior	Girio F. M. <i>et al.</i> , 2010
Problemas com corrosão de equipamentos	Menor	Maior	Girio F. M. <i>et al.</i> , 2010
Energia necessária para recuperação do ácido	Menor	Maior	Girio F. M. <i>et al.</i> , 2010
Tempo de reação	Menor	Maior	Balat, 2008; Zabed <i>et al.</i> , 2016
Conversão	Menor	Maior	Balat, 2008; Zabed <i>et al.</i> , 2016
Degradação dos açúcares gerados	Maior	Menor	Balat, 2008; Zabed <i>et al.</i> , 2016
Temperatura do processo	Alta	Moderada	Balat, 2008; Zabed <i>et al.</i> , 2016

Apesar do desenvolvimento tecnológico alcançado nos últimos anos e dos esforços realizados na otimização do processo, as etapas de pré-tratamento e hidrólise continuam sendo o grande obstáculo econômico da produção do etanol de segunda geração (HOWARD *et al.*, 2003).

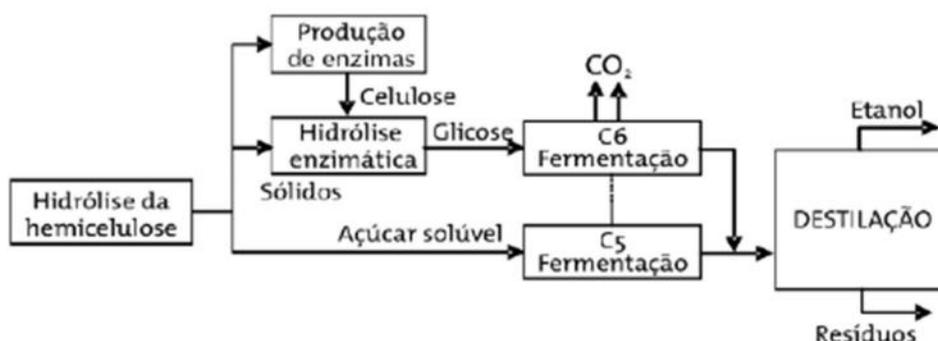
3.5.3. Fermentação

A próxima etapa, consiste na fermentação da mistura, pela ação de microrganismos, onde o mais comum é a utilização da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Tais microrganismos vão degradar moléculas de glicose presentes no caldo, levando à produção de etanol e gás carbônico. O processo geralmente possui duração de várias horas e como produto final é produzido o vinho, ou vinho fermentado (CROSATTI, 2017).

Entretanto, as etapas de hidrólise e fermentação podem ter diferentes configurações de processo visando otimizar alguns pontos do processo. Existem quatro configurações principais para o processo, que são: hidrólise enzimática separada da fermentação (SHF), hidrólise enzimática e fermentação simultâneas (SSF), hidrólise enzimática e co-fermentação simultâneas (SSCF) e bioprocessamento consolidado (BPC).

Na SHF, os materiais pré-tratados são hidrolisados para obtenção de glicose e posteriormente são fermentados a etanol em unidades distintas, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama de blocos do processo de hidrólise separada da fermentação (SHF) – Fonte: HAMELINCK, et al., 2005

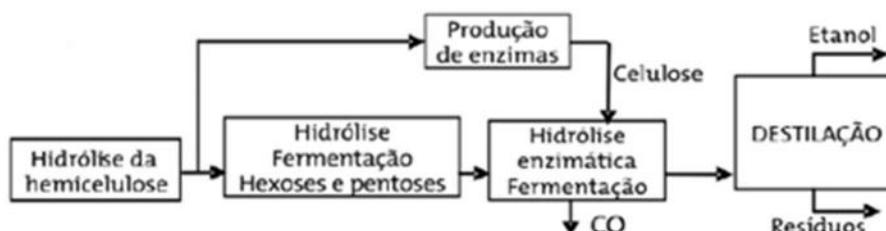


A principal vantagem dessa configuração do processo, é a condução de cada etapa em sua condição ótima, visto que a temperatura ótima para as enzimas na etapa de hidrólise está entre 45 e 50°C e a temperatura ideal para a fermentação está entre 30 e 37°C (OLSSON et al., 2006).

Entretanto, as desvantagens desse tipo de processo são: inibição do complexo de enzimas devido aos produtos finais da hidrólise (glicose e celobiose) e a possibilidade de contaminação devido à disponibilidade dos açúcares formados, dado que o tempo envolvido na etapa de hidrólise é longo (TAHERZADEH e KARIMI, 2007).

Na SSF, os materiais pré-tratados são hidrolisados a glicose e fermentados a etanol em uma mesma unidade, conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8: Diagrama de blocos do processo de hidrólise e fermentação simultâneas (SSF) – Fonte: HAMELINCK, et al., 2005



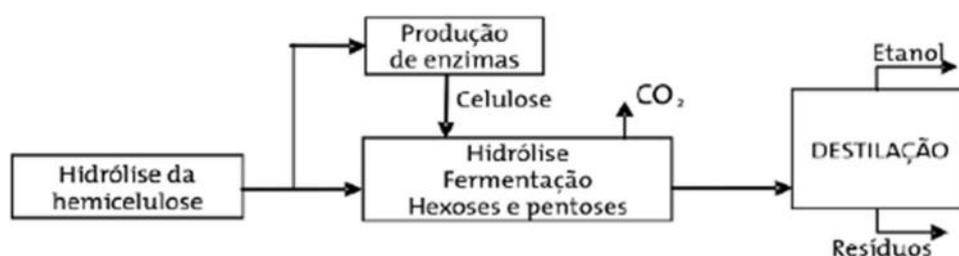
Como principal vantagem, é o rápido consumo da glicose formada na hidrólise pelo microrganismo fermentador, minimizando o risco de contaminação e

aumentando a atividade das celulases na hidrólise, visto que o produto formado está sendo prontamente fermentado. Há também um aumento de produtividade na formação de etanol, pois é necessária uma menor quantidade de enzimas no processo (McMILLAN et al., 1999).

Entretanto, estes processos são conduzidos fora das condições ótimas de operação das enzimas, de modo que um ganho de rendimento devido à menor inibição enzimática pode ser contrabalançado por uma menor atividade das enzimas em razão das condições operacionais menos apropriadas à atividade catalítica. Microrganismos termotolerantes têm sido propostos para serem usados neste processo, dessa forma, seria possível aproximar a temperatura do processo à temperatura ótima de atividade das celulases (TAHERZADEH e KARIMI, 2007).

Na SSCF, acontece a co-fermentação de ambos os açúcares, pentoses e hexoses, em uma mesma etapa, conforme demonstrado na Figura 9.

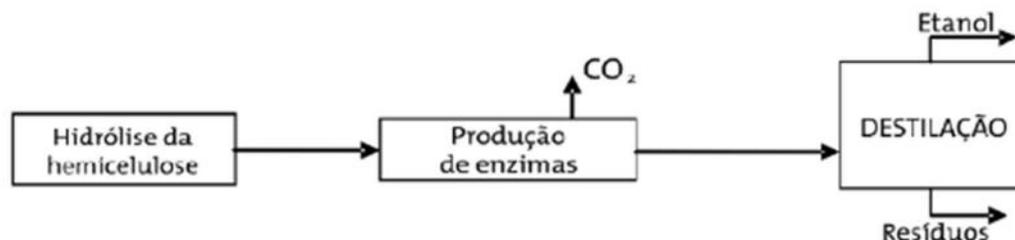
Figura 9: Diagrama de blocos do processo de sacarificação e co-fermentação simultâneas (SSCF) –
Fonte: HAMELINCK et al., 2005



Neste sentido, o hidrolisado hemicelulósico e a celulose não são separados após a etapa de pré-tratamento, permitindo que os açúcares da hemicelulose sejam convertidos a etanol juntamente com a sacarificação e fermentação do hidrolisado celulósico (TEIXEIRA et al., 2000).

No BPC, as etapas de produção de celulases, hidrólise enzimática e a fermentação de pentoses e hexoses são feitas por um mesmo microrganismo. É necessária a intervenção da biologia molecular, visando conferir a um único microrganismo as características necessárias para fermentar ambos os açúcares. O processo é demonstrado na Figura 10.

Figura 10: Diagrama de blocos do processo consolidado para a produção de etanol de segunda geração (BPC) - Fonte: HAMELINCK et al., 2005



Essa configuração permitiria a redução dos custos de produção, apresentando-se como a ideal a ser atingida. Contudo, esse tipo de processo ainda não foi desenvolvido a nível industrial com os microrganismos disponíveis atualmente, tais como *Clostridium thermocellum* e *Clostridium cellulolyticum*, necessitando-se do desenvolvimento de contínuas técnicas de engenharia genética para a construção de linhagens que possuam maiores níveis de expressão tanto de atividade enzimática quanto de fermentação (OLSON et al., 2012).

Após a etapa de fermentação, o produto obtido é constituído de leveduras, açúcares que não foram fermentados e cerca de 10% de etanol. Como o etanol está misturado com outros componentes, é necessária sua separação da mistura. O vinho é colocado em colunas de destilação, onde é aquecido até a evaporação. Em seguida, ocorre a condensação do vapor, processo no qual o etanol é separado. Assim, tem-se o álcool hidratado, que é utilizado como combustível, com cerca de 96% de teor alcoólico (NOVA CANA, 2016).

3.6. Processo de obtenção de Bioquerosene

A indústria mundial da aviação está constantemente buscando alternativas para mitigar as emissões de GEE, onde a meta até 2020 era o Crescimento Neutro em Carbono (CNG, na sigla em inglês) e uma redução de 50% nas emissões líquidas de CO₂ sobre níveis atingidos em 2005, até 2050. Várias medidas estão sendo tomadas para atingir essa meta, entre elas pode-se citar o uso mais eficiente de combustíveis com turbinas melhoradas, projetos de aviões mais leves, gerenciamento avançado do espaço aéreo e combustíveis menos poluentes (BOEING, EMBRAER, FAPESP, 2013).

Um dos principais requisitos dos biocombustíveis de aviação é que eles sejam *drop-in*, o que significa dizer que devem ser totalmente compatíveis e miscíveis com o combustível convencional. Logo, para utilização dos mesmos, não são necessárias adaptações nas aeronaves e nem restrições do seu uso (ROITMAN, 2018).

O bioquerosene pode ser produzido através de diversos processos e matérias-primas, como biomassas lignocelulósicas, fontes sacarinas, amiláceas e óleos vegetais. No Brasil há um grande número de espécies nativas que produzem óleo em frutos e grãos, com diferentes potencialidades e adaptações naturais a distintas condições de clima e solo. Os desafios quanto ao uso das matérias-primas oleaginosas e às estratégias de desenvolvimento da cadeia de produção de bioquerosene de aviação no Brasil passam por gargalos tecnológicos, devido ao alto custo do processo (EMBRAPA, 2015).

Até 2017, cinco rotas foram aprovadas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para a produção de combustível alternativo e diversas outras estavam em processo de certificação ou em fase de estudo (VILT, 2017). As rotas aprovadas são: querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (rota FT); querosene parafínico sintetizado por hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos (rota HEFA); iso-parafinas sintetizadas por hidrocessamento de açúcares fermentados (rota HFS-SIP); querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch com aromáticos (FT/A); querosene parafínico sintetizado a partir de álcoois – “*Alcohol to Jet*” (rota ATJ).

Para sintetizar o biocombustível, tem-se como principais rotas: química, bioquímica e termoquímica. Na Tabela 3, estão apresentados os processos e as matérias-primas mais utilizados para cada rota.

Tabela 3: Principais rotas, matérias-primas e processos utilizados na produção de biocombustíveis

Rotas	Matéria-prima	Processo
Conversão química	Óleo vegetal	Transesterificação/ Hidrodessoxigenação
Conversão bioquímica	Cana de açúcar	Fermentação
Conversão termoquímica	Biomassa celulósica	Gaseificação - Processo de Fischer-Tropsch

As rotas química e bioquímica apresentadas acontecem por meio de transesterificação/hidrodessoxigenação e fermentação das suas respectivas matérias-primas, respectivamente. Já a rota termoquímica, trata-se de uma sequência de duas reações, sendo a primeira responsável pela produção do gás de síntese (mistura $H_2:CO$), através da gaseificação de biomassa lignocelulósica, e a segunda pela conversão deste gás em bioquerosene, mediante a reação catalítica de Fischer-Tropsch. As fontes da biomassa que incluem resíduos agrícolas ou resíduos verdes urbanos são os mais indicados para a produção de biocombustíveis, sendo alternativas importantes para os combustíveis de origem fóssil (RAMOS et al., 2011).

No processo *Biomass to Liquid* (BtL), a matéria-prima é decomposta primeiramente através da gaseificação, um processo de conversão termoquímica no qual a biomassa é aquecida a uma temperatura extremamente elevada, promovendo a quebra das moléculas, produzindo o gás de síntese. A matéria-prima inicialmente sofre uma oxidação parcial a temperaturas entre 800 e 1200 °C. Este gás combustível posteriormente pode ser utilizado em equipamentos como turbinas a gás, motores alternativos de combustão interna - aplicados a conversão de potência - e podem-se obter também combustíveis líquidos (LORA, 2012). O objetivo da gaseificação é a obtenção do gás de síntese, porém, juntamente com este saem outros compostos, tais como metano, vapor d'água e gases provenientes da composição da matéria-prima utilizada. A qualidade da composição dos produtos desta reação depende de alguns fatores como o tipo de reator, tempo de residência, as características físico-químicas da biomassa e agentes de gaseificação (LORA 2012).

Este, então, é convertido em hidrocarbonetos de cadeia longa (C5+) em fase líquida através do processo de Fischer-Tropsch (GUPTA et al., 2011). A reação de Fischer-Tropsch trata-se de um processo catalítico para a conversão de gás de síntese em uma ampla variedade de hidrocarbonetos de diversos pesos moleculares. Esta corrente de óleo bruto sintético (mistura de hidrocarbonetos) é chamada de "syn crude" (RAFIEE e HILLESTAD, 2012). As condições operacionais recomendadas são de 10 a 40 bar e de 150 a 300°C (GUELL et al, 2012). Para este processo, há diferentes catalisadores, porém, como estabelecido pela Resolução ANP nº 20, de 24.6.2013, para a produção de bioquerosene destinado a aviação, deve ser utilizado catalisador a base de ferro ou cobalto com o objetivo de direcionar o mecanismo da reação à formação de parafinas e olefinas.

As parafinas e as olefinas, então, são craqueados e isomerizados para produzir combustíveis líquidos essencialmente idênticos às isoparafinas presentes no combustível de origem fóssil, mas não incluem em sua composição compostos aromáticos, e, portanto, possui limite de mistura de 50% em volume, pois o QAV exige a presença mínima de 8% de aromáticos, segundo a resolução ANP. Contudo, utilizando a nafta, que é um coproduto do processo, através de uma etapa de reforma, pode-se produzir os aromáticos necessários à mistura, garantindo um bioquerosene capaz de substituir completamente o combustível fóssil (ROITMAN, 2018).

Identificou-se que as diferentes rotas tecnológicas estão em pleno desenvolvimento, sem que uma delas tenha sido especificamente escolhida para ser aquela que irá compor o mercado; algumas já certificadas pela ASTM para uso comercial em até uma mistura 50/50 com o querosene de origem fóssil, como as rotas por hidroxidação, a rota por Fischer-Tropsch e a rota bioquímica com a utilização de leveduras modificadas geneticamente. Todas elas indicam estar em fase de competição por mercados.

Devido ao pouco tempo de estudo e produções ainda em pequena escala, há poucos dados na literatura para estimar os custos exatos do bioquerosene produzido por esses processos, bem como seu preço de venda em escala comercial. A Tabela 4 compara diversas matérias-primas e três das rotas aprovadas, assim como a estimativa de alguns autores para os custos.

Tabela 4: Custo de produção das principais rotas de produção de Bioquerosene – Fonte: Elaboração própria a partir de ICAO 2017 (continua)

Rotas de produção	Matéria-prima	Custo (US\$/L)	Referência
	Óleo de carmelina	0,8	Natelson <i>et al.</i> , 2015
	Óleo de palma	0,70-0,79	Hilbers <i>et al.</i> , 2015
	Óleo de soja	1,01-1,16	Pearlson <i>et al.</i> , 2013
HEFA	Óleo de cozinha usado	0,88-1,06 (PMV)*	Seber <i>et al.</i> , 2014
	Sebo	1,05-1,25 (PMV)*	Seber <i>et al.</i> , 2014
	Óleo residual	1,03	De Jong <i>et al.</i> , 2015

Tabela 4: Custo de produção das principais rotas de produção de Bioquerosene – Fonte: Elaboração própria a partir de ICAO 2017 (conclusão)

FT	Palha de milho	0,9	Agusdinata <i>et al.</i> , 2011
	Gramíneas	1,1	Agusdinata <i>et al.</i> , 2011
	Lignocelulose	1,96 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016
	Madeira	1,14-1,22 (PMV)*	Zhu <i>et al.</i> , 2011
	Madeira	1,13	Ekbon <i>et al.</i> , 2009
ATJ	Etanol de cana de açúcar	1,56 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Etanol de milho	1,75 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Etanol de gramíneas	2,30 (PMV)*	Staples <i>et al.</i> , 2014
	Lignocelulose (gás de síntese)	1,80 (PMV)*	Atsonios <i>et al.</i> , 2015
	Lignocelulose (gás de síntese)	2,00 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016
	Lignocelulose (gás de síntese)	2,76 (PMV)*	Diederichs <i>et al.</i> , 2016

*PMV: Preço mínimo de venda

A rota HEFA é apresentada como a de menor custo de produção se empregado o óleo de palma como matéria-prima, seguida do uso de óleo de camelina. Porém, devido ao preço da matéria-prima e a seu uso na indústria de alimentos, esse processo não é tão utilizado. Assim como a rota ATJ que apresenta custos relativamente superiores a partir de álcoois, devido à utilização de produtos comerciais para sua produção. Então, a rota mais estudada e utilizada atualmente é a rota FT, principalmente quando matérias-primas de menor valor são utilizadas.

4. METODOLOGIA

4.1. Condições selecionadas para a avaliação econômica dos processos

Neste item serão apresentadas as condições, materiais e rotas tecnológicas selecionadas para obtenção dos biocombustíveis avaliados neste trabalho. As escolhas aqui listadas foram feitas com base nas informações contidas na literatura,

em dados coletados com representante da Cervejaria Ambev e, principalmente, nas experiências dos pesquisadores do Laboratório de Tecnologias Verdes – GreenTec.

Tendo como base as informações apresentadas nos capítulos anteriores a respeito do aumento no uso de biomassas lignocelulósicas na obtenção biocombustíveis e no potencial de utilização de bagaço de malte, oriundo da etapa de mosturação na indústria cervejeira, como matéria-prima para tal, o presente trabalho irá considerar o uso deste material para obtenção de etanol de segunda geração e bioquerosene de aviação.

4.2. Obtenção de Etanol de Segunda Geração (E2G)

Em relação ao processo de obtenção de etanol de segunda geração, optou-se por considerar para este estudo a utilização da metodologia de hidrólise e fermentação separadas (SHF), onde a hidrólise dos componentes da biomassa lignocelulósica e a fermentação dos açúcares fermentescíveis ocorrem em reatores diferentes. Além disso, optou-se também em utilizar uma rota tecnológica composta por processos químicos.

Antes de tudo, a primeira etapa a ser realizada neste processo é a etapa de moagem. Esta funciona como pré-tratamento físico onde é obtido um material com menor tamanho de partícula e mais uniforme, aspecto que permite alcançar melhores rendimentos nas etapas seguintes, já que torna os componentes do material lignocelulósico mais disponíveis/expostos.

Após a moagem, a biomassa segue para a etapa de hidrólise ácida da hemicelulose, onde é considerado o uso de ácido sulfúrico 0,8% m/m (em relação à massa de biomassa seca) em uma relação sólido líquido igual a 1:4 e temperatura igual a 120°C durante 30 minutos em reator autoclave. O resultado dessa hidrólise é a obtenção de um hidrolisado hemicelulósico (líquido) e a celullignina (sólido), que são separados através da etapa de prensagem.

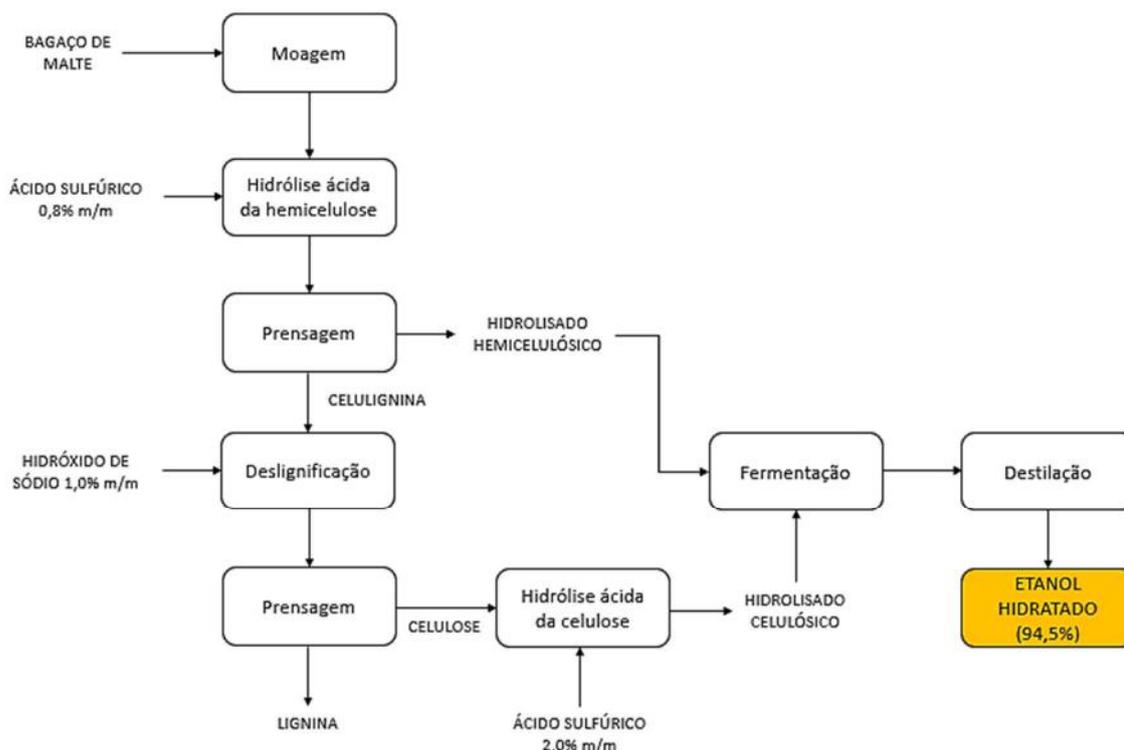
O hidrolisado hemicelulósico, por conter pentoses e hexoses (xilose e glicose, majoritariamente), segue para a etapa de fermentação onde é considerada a utilização da levedura floculante *Pichia stipitis*, que é capaz de fermentar ambos os tipos de açúcares, a uma concentração celular inicial igual a 10 g.L⁻¹. Já a celullignina é encaminhada para a etapa de deslignificação, que nada mais é do que uma hidrólise alcalina para remoção da lignina e extração da fração celulósica contida na

biomassa. Nessa etapa, considera-se o uso de hidróxido de sódio 1,0% m/m (em relação à massa de biomassa seca) em uma relação sólido:líquido igual a 1:20 e temperatura igual a 100°C durante 30 minutos em reator autoclave. O produto dessa etapa é separado, através de mais uma etapa de prensagem, em uma fração de lignina e outra de celulose, sendo a primeira um resíduo que pode ser reaproveitado e a segunda a matéria-prima para a próxima etapa do processo de obtenção do E2G.

A fração celulósica extraída é encaminhada para a etapa de hidrólise ácida. Neste ponto, considera-se novamente o uso de ácido sulfúrico, mas desta vez a uma concentração igual a 2,0% m/m (em relação à massa de biomassa seca) em uma relação mássica de sólido:líquido igual a 1:4 e temperatura igual a 120°C durante 30 minutos em reator autoclave. Após essa etapa, obtém-se o hidrolisado celulósico, que é composto basicamente por glicose. Sendo assim, esse hidrolisado é encaminhado para a etapa de fermentação, onde, dessa vez, considera-se a utilização da *Saccharomyces cerevisiae*, principal micro-organismo utilizado em processos industriais de fermentação alcoólica e que consome, preferencialmente, glicose como fonte de carbono. Assim como na fermentação do hidrolisado hemicelulósico, considera-se uma concentração celular inicial igual a 10 g.L⁻¹.

Por fim, após as duas etapas de fermentação, o produto fermentado é encaminhado para a etapa de destilação. Nesta última etapa, objetiva-se obter o álcool hidratado (94,5% mín.).

O procedimento descrito anteriormente é resumido no diagrama de blocos apresentado na Figura 11.

Figura 11: Diagrama de blocos do processo de obtenção de etanol de segunda geração

A Tabela 5 apresenta um resumo dos reagentes, temperatura, tempo e relação sólido:líquido de cada etapa do processo de obtenção do etanol de segunda geração.

Tabela 5: Resumo das condições das etapas do processo de obtenção de etanol de segunda geração– Fonte: Elaboração própria a partir de VIANA, 2017

Etapas	Reagentes (m/m)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Relação sólido:líquido
Hidrólise ácida da hemicelulose	Ácido sulfúrico 0,8%	120	30	1:4
Designificação	Hidróxido de sódio 1,0%	100	30	1:20
Hidrólise ácida da celulose	Ácido sulfúrico 2,0% m/m	120	30	1:4
Fermentação	Micro-organismos: <i>Pichia stipitis</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> com concentração inicial igual a 10g/L			

Cabe ressaltar que as condições operacionais aqui explicitadas foram selecionadas com base em estudos realizados no Laboratório de Tecnologias Verdes – GreenTec (VIANA, 2017). Essas condições são comumente empregadas em

materiais de composição lignocelulósica e podem ser ainda otimizadas para obtenção de melhores resultados.

4.3. Obtenção de Bioquerosene de Aviação

Dentre as rotas de obtenção de bioquerosene aprovadas pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, a rota que será abordada neste trabalho é a de Fischer-Tropsch para conversão do bagaço de malte em querosene parafínico hidroprocessado. Devido ao fato desse processo ser baseado na gaseificação da biomassa e conversão do gás formado em líquido, ele também recebe o nome BtL, do inglês *Biomass to Liquid*.

A primeira etapa desse processo é a gaseificação da biomassa, onde o material lignocelulósico, a partir de uma conversão termoquímica, é transformado em gás de síntese (mistura de $H_2:CO$). Essa etapa pode ser dividida em quatro sub-etapas: secagem, pirólise, combustão e redução.

Secagem: processo endotérmico onde o calor da combustão é captado e utilizado para a evaporação da água presente na estrutura da biomassa. Essa umidade é removida a $160^{\circ}C$.

Pirólise: consiste na remoção dos voláteis presentes na biomassa. Componentes termicamente instáveis, como a lignina, são quebrados e evaporados durante esse processo que inicia em temperaturas entre $230^{\circ}C$ e $350^{\circ}C$, podendo alcançar $1000^{\circ}C$.

Combustão: etapa que consiste na oxidação do material lignocelulósico e é responsável por fornecer o calor necessário para as próximas etapas.

Redução (gaseificação): composta por reações endotérmicas que ditam a composição final do gás de síntese.

Cabe ressaltar que as reações de redução dependem do tipo de agente gaseificante utilizado. Neste trabalho optou-se por considerar a gaseificação a vapor devido à geração de elevada concentração de hidrogênio e a ausência de nitrogênio.

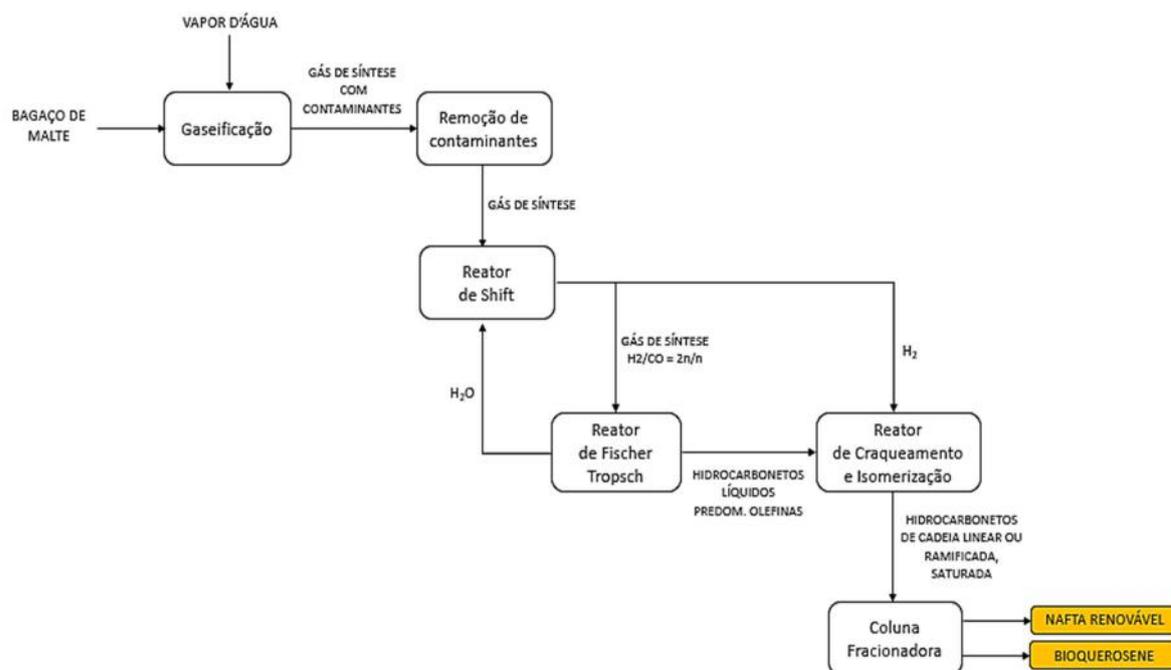
Após essa primeira etapa, o gás de síntese gerado é encaminhado para etapa de remoção de contaminantes. Em seguida, esse gás é conduzido para um reator de

Shift para que a razão $H_2:CO$ seja ajustada através da reação química entre o monóxido de carbono e vapor d'água.

A proporção $H_2:CO$ utilizada na reação de Fischer-Tropsch por apresentar bons resultados para síntese de olefinas na faixa da gasolina e do querosene de aviação é igual a $2n/n$. Além disso, para essa etapa é necessária a utilização de catalisador de cobalto e temperatura de operação em torno de $340^\circ C$.

Por fim, as olefinas produzidas a partir da reação de FT são isomerizadas, formando majoritariamente isoparafinas, que são posteriormente fracionadas a temperaturas entre $150^\circ C$ e $300^\circ C$ para, então, poderem ser utilizadas como querosene de aviação. Abaixo, na Figura 12, consta um diagrama de blocos onde são apresentadas as etapas acima descritas.

Figura 12: Diagrama de blocos do processo de obtenção de bioquerosene



4.4. Dados quantitativos utilizados na avaliação econômica

Neste item encontram-se as considerações realizadas a respeito dos balanços de massa dos processos de obtenção de 100.000 toneladas de etanol de segunda geração (hidratado) e bioquerosene de aviação utilizando bagaço de malte como matéria-prima no período de um ano. Os valores aqui demonstrados foram obtidos a partir das condições consideradas para ambos os processos e que constam nas seções 4.2 e 4.3 deste trabalho.

4.4.1. Balanço de massa do processo de obtenção de E2G por rota química

Para os cálculos relativos à avaliação econômica, está sendo considerada neste trabalho uma produção anual de etanol de segunda geração igual a 100.000 toneladas/ano. A partir disto e de dados obtidos por pesquisas realizadas no laboratório GreenTec (VIANA, 2017), é possível calcular as quantidades necessárias de biomassa, reagentes químicos e leveduras para esse processo, além de determinar a quantidade de resíduos gerados. Na Tabela 6 constam os dados utilizados como referência, obtidos a partir de experimentos realizados no laboratório GreenTec (VIANA, 2017), como também o volume dos componentes calculados com base na densidade do etanol (789 kg/m^3).

Tabela 6: Dados de consumo específico de reagentes e insumos e resíduos gerados – Fonte: Elaboração própria a partir de VIANA, 2017

Reagente / Insumo	Quantidade	Quantidade/ano
Ácido sulfúrico	$0,25 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ de etanol	$3,20 \times 10^4 \text{ m}^3$
Hidróxido de sódio	$120 \text{ kg} / \text{m}^3$ de etanol	$1,52 \times 10^7 \text{ m}^3$
Leveduras	$150 \text{ kg} / \text{m}^3$ de etanol	$1,90 \times 10^7 \text{ m}^3$
Biomassa seca	1 tonelada / 100 L de etanol	$1,27 \times 10^6 \text{ m}^3$

Resíduo	Quantidade	Quantidade/ano
Sólido	$2 \text{ kg} / 1 \text{ L}$ de etanol	$2,50 \times 10^5 \text{ m}^3$
Líquido (licor negro)	$1 \text{ L} / 1 \text{ L}$ de etanol	$1,30 \times 10^5 \text{ m}^3$

Cabe aqui ressaltar novamente que as condições de produção do etanol de segunda geração aqui consideradas e, conseqüentemente, as quantidades listadas na Tabela 6 podem ser otimizadas para obtenção de melhores resultados.

4.4.2. Balanço de massa do processo de obtenção de bioquerosene a partir da rota de Fischer-Tropsch

Para a avaliação econômica da produção de bioquerosene de aviação a partir de bagaço de malte também foi considerado um volume de produção do biocombustível igual a 100.000 toneladas/ano. Para o cálculo dos principais componentes envolvidos neste processo foram considerados algumas premissas técnicas obtidas a partir de dados fornecidos pela COPPE/UFRJ (ROITMAN, 2018) e pela Petrobras, demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7: Premissas adotadas para as variantes tecnológicas da rota BtL-FT

Item	Valor (%m/m)	Referência
Razão catalisador de cobalto / bioquerosene	0,004%	Petrobras
Razão bioquerosene / biomassa	14,58%	COPPE/UFRJ
Razão nafta / bioquerosene	32,00%	COPPE/UFRJ

Com base nas premissas técnicas apresentadas, foi realizado o balanço de massa global do processo. Os valores determinados constam na Tabela 8.

Tabela 8: Quantidades obtidas para o balanço de massa global

Componente	Quantidade (ton/ano)
Bioquerosene	100.000
Nafta	32.000
Biomassa	6,85 x 10 ⁵
Catalisador de cobalto	4

Cabe salientar que a matéria-prima considerada neste trabalho (bagaço de malte) é o resíduo obtido a partir da produção de cerveja nas cervejarias Ambev no Brasil. Através do relatório de resultados da Ambev do ano de 2020, o volume de cerveja produzida no país superou 84 milhões de hectolitros. A quantidade de bagaço

gerada no processo de obtenção da cerveja é estimada através da razão 1.400 hL de mosto / 21 toneladas de bagaço, informada pela Supervisora de Coprodutos da Cervejaria Rio de Janeiro. Ou seja, a quantidade de bagaço gerada anualmente pelas cervejarias localizadas no território brasileiro ultrapassa 1,27 milhões de toneladas. Essa quantidade é suficiente para produção da quantidade de etanol de segunda geração ou bioquerosene aqui proposta.

4.5. Premissas monetárias consideradas na avaliação econômica

Dentre as informações que aqui serão retratadas estão as de estimativas dos custos necessários com reagentes e insumos, os investimentos em bens de capital e os gastos energéticos, para produção durante 20 anos.

4.5.1. Custos com reagentes e insumos

4.5.1.1. Etanol de segunda geração

Como descrito na seção 3.5. deste capítulo, os principais componentes considerados no balanço de massa do processo de obtenção do etanol de segunda geração através de rota química são os reagentes ácido e básico utilizados nas etapas de hidrólise, a biomassa, as leveduras e os resíduos gerados no processo. O valor de mercado de cada um deles é informação primordial para a realização desta avaliação econômica.

O bagaço de malte considerado neste trabalho é o resíduo obtido a partir da produção de cerveja nas cervejarias Ambev. O valor de venda dessa biomassa foi obtido através do contato com a Supervisora de Coprodutos da Cervejaria Rio de Janeiro. Vale ressaltar que esse valor é sazonal e que o preço aqui considerado é referente ao mês de abril do ano de 2021.

Os valores de mercado do ácido sulfúrico e da levedura considerados neste trabalho foram obtidos a partir de Viana (2017). Os valores foram atualizados posteriormente por fornecedores destes materiais.

Já os valores do hidróxido de sódio e do resíduo líquido (licor negro) gerado no processo foram encontrados na literatura. O primeiro teve sua faixa de preço

informada por Maurício Russomano, presidente do Sindicato Nacional da Indústria de Álcalis, para a revista Química e Derivados em junho de 2020. Segundo Russomano, as cotações internacionais do hidróxido de sódio giram entre US\$ 300 e US\$ 350 a tonelada. Para os cálculos desenvolvidos será considerada a cotação atual do dólar e o maior valor fornecido por Russomano (2020).

O licor negro possui interesse comercial devido a sua capacidade energética através da queima e, mais recentemente, devido à busca pela obtenção de produtos de maior valor agregado obtidos a partir do seu constituinte principal: a lignina. Com isso, será considerada a sua venda como receita nesta avaliação econômica. Segundo Bruijninx et al. (2016), o valor da lignina para fins de geração de energia varia de US\$ 70 a US\$ 150 por tonelada, considerando preços de transportadores de energia, umidade, logística e contaminações. Assim, o valor atribuído a sua venda considerado aqui será a média dos dois preços acima citados: US\$ 110 por tonelada.

A Tabela 9 resume os preços considerados para cada componente acima descrito.

Tabela 9: Premissas monetárias adotadas para os componentes utilizados na obtenção de E2G através da rota química

Item	Valor	Referências
Bagaço de malte	R\$ 79,00 / ton	Ambev
Ácido sulfúrico	R\$ 800,00 / m ³	GreenTec
Hidróxido de sódio	US\$ 350 / ton	Sinálcalis
Levedura	R\$ 1,50 / kg	GreenTec
Resíduo líquido (licor negro)	US\$ 110 / ton	S.V. Obydenkova et al (2019)

4.5.1.2. Bioquerosene

Em relação à obtenção de bioquerosene de aviação através da rota de Fischer-Tropsch, as premissas monetárias a serem consideradas nos cálculos da avaliação econômica seguem listadas abaixo. Foram considerados dados obtidos por pesquisas realizadas por membros do laboratório GreenTec. Em relação ao bagaço de malte, foi considerado o valor fornecido pela Ambev, dados que estão demonstrados na Tabela 10.

Tabela 10: Premissas monetárias adotadas para os componentes utilizados na obtenção de bioquerosene de aviação através da rota BtL-FT

Item	Valor	Referência
Bagaço de malte	R\$ 79,00 / ton	Ambev
Catalisador de cobalto	US\$ 50.000 / ton	Petrobras
Nafta	US\$ 555,3 / ton	indexmundi.com

4.5.2. Despesas de capital (CAPEX)

Nesta etapa do trabalho serão definidos os valores a serem considerados como investimentos em bens de capital a serem considerados na avaliação das rotas químicas para obtenção dos biocombustíveis de interesse.

4.5.2.1. Etanol de segunda geração

Em relação à planta industrial para produção de etanol de segunda geração foram utilizados dados referentes à usina de produção de etanol 2G em escala comercial construída e operada pela Raízen.

A planta em questão fica localizada na cidade de Piracicaba (SP) e possui uma capacidade instalada de 40 milhões de litros de E2G por ano, o que a torna a segunda maior usina desse biocombustível no território brasileiro. Ela utiliza como matéria-prima o bagaço de cana residual do processamento do etanol de primeira geração e realiza a fermentação de pentoses e hexoses. Apesar de utilizar a hidrólise enzimática como estratégia para quebra da celulose, será considerada esta planta nos cálculos de avaliação econômica por não haver diferença significativa em termos de equipamentos utilizados. (LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N)

É preciso destacar que foi necessário realizar o ajuste de escala do valor da planta da Raízen para a que está sendo abordada neste trabalho. Enquanto a planta de referência possui capacidade de 40 milhões de litros de etanol 2G por ano (o equivalente a 31.560 toneladas/ano), a planta de interesse leva em consideração a produção de 100.000 toneladas do biocombustível por ano. Assim, para realizar o ajuste do valor do custo da planta foi utilizada a equação:

$$\text{Custo A} = \text{Custo B} * \left(\frac{\text{Capacidade da unidade A}}{\text{Capacidade da unidade B}} \right)^{0,6}$$

Ref. Peters and Timmerhaus, 1991

Assim, partindo da planta comercial da Raízen que possui CAPEX igual a R\$ 218 milhões, chegou-se ao valor de R\$ 437 milhões. Convertendo para dólar, temos US\$ 80,9 milhões para o investimento em bens de capital na planta estudada, conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11: Comparativo das condições e custo da planta referência (Raízen) e da planta em análise

Variável	Raízen	Planta em estudo
Capacidade	31.560 ton etanol / ano	100.000 ton etanol / ano
Custo da planta	R\$ 218 milhões	R\$ 437 milhões
Hidrólise	Enzimática	Química
Fermentação	C5 e C6	C5 e C6
Matéria-prima	Bagaço de cana	Bagaço de malte

4.5.2.2. Bioquerosene

Em relação à planta industrial para produção de bioquerosene foram utilizados valores retirados de informações da literatura (CARVALHO, 2017; RICHES, 2007) e a estimativa do CAPEX para uma unidade que produz 100.000 toneladas SAF/ano. Assim como para o etanol, foi necessário realizar o ajuste de escala do valor da planta para a que está sendo abordada neste trabalho, obtida aplicando o método de fator de capacidade e considerando um expoente de ajuste x de 0,6.

Assim, o valor a investir na aquisição da unidade BtL-FT foi de US\$ 148 milhões ou o equivalente a R\$ 799,2 milhões. Através desse valor base, foi calculado também todo o gasto com máquinas, equipamentos e engenharia para o projeto, conforme detalhado a seguir na Tabela 12.

Tabela 12: Resumo CAPEX das rotas FT (valores em mil R\$)

Item	%	BTL-FT (mil R\$)
Máquinas e equipamentos		
Planta BTL-FT	-	799.200
Tancagem	10,00%	79.920
Bombas	0,30%	2.398
Utilidades	4,00%	31.968
Equipamentos de laboratório	1,00%	7.992
Sistema combate a incêndio	0,90%	7.193
Obras civis e construções	9,00%	71.928
Instalações e outros	3,00%	23.976
Engenharia e projeto	1,00%	7.992
Total		1.032.567

4.5.3. Gastos energéticos

Em um mercado cada vez mais competitivo e com a crescente preocupação com a sustentabilidade, a redução de desperdícios dos gastos energéticos é essencial para o sucesso da planta. O processo é analisado e projetado de modo a atingir condições de operação ótimas, minimizando custos e maximizando a eficiência termodinâmica, ou seja, evitando gargalos que tornam as etapas que envolvem a transferência de energia menos eficientes. No Brasil, o setor industrial é responsável por 31,7% do consumo energético, e a energia elétrica é um insumo que representa mais de 40% dos custos na produção industrial brasileira (Firjan/Agência Brasil).

4.5.3.1. Etanol de segunda geração

Para o processo de obtenção do etanol de segunda geração, consideram-se as etapas de moagem, hidrólise, fermentação, destilação e manutenção da planta. O

grande gargalo para o consumo energético da planta é a etapa de hidrólise, que consome cerca de 72% do gasto em todo o processo. Os resultados apresentados a seguir na Tabela 13 detalham o custo energético do processamento de uma tonelada de biomassa.

Tabela 13: Custo energético de cada etapa do processo de obtenção de etanol por tonelada de cana-de-açúcar – Fonte: Elaboração própria a partir de Revista Energia na Agricultura (ISSN 1808-8759)

Etapa industrial	Cana-de-açúcar (MJ/t)
Desintegração / moagem	61,87
Hidrólise / sacarificação / tratamento do caldo	1179,54
Fermentação	0,38
Destilação	399,28
Manutenção	0,5
Consumo industrial por tonelada	1641,57

Na Tabela 14, são consideradas as mesmas etapas anteriores, porém tomando como base para referência o gasto energético por litro de etanol.

Tabela 14: Custo energético de cada etapa do processo de obtenção de etanol por litro de etanol – Fonte: Revista Energia na Agricultura (ISSN 1808-8759)

Operações	Cana-de-açúcar (MJ/l)
Desintegração / moagem	0,73
Hidrólise / sacarificação / tratamento do caldo	13,93
Fermentação	0
Destilação	4,71
Manutenção	0,01
Custo energético total	19,38

4.5.3.2. Bioquerosene

Para o processo de obtenção da Bioquerosene, foram consideradas as demandas elétricas das unidades de pré-tratamento, separação de ar, gaseificação e tratamento de enxofre, separação de H₂, síntese de Fischer-Tropsch, hidrocessamento e compressão do CO₂, conforme demonstrado na Tabela 15.

Tabela 15: Demanda elétrica de cada etapa do processo de obtenção do Bioquerosene – Fonte: Elaboração própria a partir de TAGOMORI, 2017

Unidade	Escala simulação	Demanda elétrica (MW)
Pré-tratamento	4320 t biomassa / dia	6,87
Separação de ar	-	29,5
Gaseificação	-	6,6
Tratamento de enxofre	-	1,8
Separação de H ₂ (PSA)	11,52 t H ₂ / dia	0,4
Síntese de Fischer-Tropsch	618 t FT / dia	2,39
Hidrocessamento	618 t FT / dia	3,24
Compressão do CO ₂	4440 t CO ₂ / dia	1,11

A demanda de eletricidade resultante foi de aproximadamente 52 MW. O consumo anual de eletricidade calculado com base na disponibilidade anual da planta (7.446 horas), resultou em um total de 387.192 MWh.

4.5.4. Premissas para dimensionamento da planta

Para realizar o dimensionamento da planta completa é necessário a utilização de algumas premissas para determinação das receitas e custos dos processos de obtenção de etanol de segunda geração e bioquerosene, além do investimento necessário para cada caso. Com base nessas informações, pode-se avaliar suas rentabilidades e realizar o comparativo entre elas.

Na Tabela 16, estão listados os dados técnicos referentes a planta de produção de etanol de segunda geração. A capacidade foi definida como 100.000 toneladas de etanol/ano. A produção do primeiro ano estimada em 77% da capacidade total, e

a partir do segundo ano, 100% da capacidade. As razões de alimentação das correntes e informações tabeladas necessárias para os cálculos foram retiradas da literatura, segundo as referências mencionadas.

Tabela 16: Dados técnicos da produção de etanol

Item	Valor	Referência
Capacidade da Planta (t Etanol/ano)	100.000	BP
Produção do primeiro ano	77%	Estimativa
Produção dos anos 2-20	100%	Estimativa
PCI etanol hidratado, MJ/litro	21,3	ANP
CI (gCO ₂ eq/MJ), gasolina	87,4	Diário Oficial da União (nov/18)
E2G PCI, MMBTU/ton biomassa	18,33	SILVA, 2018
E2G Razão Etanol/Biomassa, %m/m	7,90%	Nova Cana
E2G Razão Ác. sulfúrico/Etanol, %m/m	58,20%	VIANA, 2017
E2G Razão Hid. de sódio/Etanol, %m/m	15,20%	VIANA, 2017
E2G Razão Levedura/Etanol, %m/m	19,00%	VIANA, 2017
E2G Razão etanol hid./Biom. seca, t/L	0,01	VIANA, 2017
E2G kg resíduo sólido/L etanol	2	VIANA, 2017
E2G razão llicor negro)/etanol, %m/m	127%	VIANA, 2017
E2G CI (gCO ₂ eq/MJ)	4,7	Revista Opiniões
E2G Energia Elétrica, kWh/ton etanol	380,23	ARAUJO, 2017
Densidade etanol hidratado (kg/m ³)	789	VIANA, 2017

Na Tabela 17, estão listados os dados técnicos referentes a planta de produção de Bioquerosene. A fim de comparação, também foi definido a capacidade total da planta como 100.000 toneladas de bioquerosene/ano. A produção do primeiro ano estimada como 77% da capacidade total, e a partir do segundo ano, 100%. As razões de alimentação das correntes e informações tabeladas necessárias para os cálculos, foram retiradas da literatura, segundo as referências informadas.

Tabela 17: Dados técnicos da produção de bioquerosene

Item	Valor	Referência
Capacidade da Planta (t Bioq/ano)	100.000	BP
Produção do primeiro ano	77%	Estimativa
Produção dos anos 2-20	100%	Estimativa
PCI bioQAv, MJ/litro	32	ANP
CI (gCO ₂ eq/MJ), QAv fóssil	87,5	Diário Oficial da União (nov/18)
BTL-FT PCI da biomassa, MMBTU/ton biomassa	18,33	SILVA, 2018
BTL-FT Razão Vapor/biomassa, % m/m	40%	COPPE/UFRJ
BTL-FT Densidade Vapor a 1200°C e 20bar, ton/m ³	0,00294	Estimativa
BTL-FT Razão Catalisador de cobalto/bioQAv	0,004%	Petrobras
BTL-FT Razão BioQAv/Biomassa, %m/m	14,58%	COPPE/UFRJ
BTL-FT Razão Nafta/Bioquerosene, %m/m	32,00%	COPPE/UFRJ
BTL-FT CI (gCO ₂ eq/MJ)	15	COLLINGS, D. 2020
BTL-FT Energia Elétrica, kWh/ton bioQAv	639,94	COPPE/UFRJ
Expoente scale up para BTL/FT	0,6	Peters & Timmerhaus

Em seguida, foi necessário fixar alguns parâmetros temporais, conforme exemplificado na Tabela 18, como o período de projeção da planta, dias por ano de produção e o tempo de partida, para projetar a parte econômica durante todo o período considerado.

Tabela 18: Dados temporais

Item	Valor	Referência
Tempo de projeção, anos	20	BP
Dias de produção por ano	320	BP
Horas de produção por ano	7.680	-
Tempo de partida da planta, dias	30	BP

Para cálculo dos custos e receitas de cada planta, foram determinados os dados monetários como, por exemplo, o preço de cada insumo e produto, e o preço do bagaço de malte, este último fornecido pela Ambev. As cotações do dólar e do euro foram fixadas em setembro de 2021, visto que este é o período em que as empresas, geralmente, projetam as métricas monetárias e de performance para o orçamento do exercício seguinte. Esses dados foram utilizados para conversão de valores, assim como os créditos de carbono variáveis por período, que podem ser vendidos para incremento de receita. Todos os valores estão exemplificados na Tabela 19.

Tabela 19: Dados monetários

Item	Valor	Referência
E2G Preço Etanol, R\$/m ³	3.855,00	Nova Cana
E2G Preço Ácido Sulfúrico R\$/m ³	800	VIANA, 2017
E2G Preço Hidróxido de sódio R\$/kg	1,75	Sinálcalis
E2G Preço levedura R\$/kg	1,89	VIANA, 2017
E2G Preço lignina R\$/t	594	Obydenkova, 2019
E2G Manutenção, R\$/ton Etanol	17	Petrobras
BTL-FT Preço do BM, US\$/MMBTU	0,8	Ambev
BTL-FT Preço do vapor, R\$/m ³	17	TCWY
BTL-FT Preço cat. de cobalto, US\$/ton	50.000,00	Petrobras
BTL-FT Preço da Nafta, US\$/ton	555,3	indexmundi.com
BTL-FT Preço Energia Eléctrica, R\$/kW	0,47	MME
BTL-FT Manutenção, R\$/ton bioQAv	17	Petrobras
Preço do BioQAv, R\$/m ³	5.000	Petrobras
Cotação do dólar	5,4	Estimativa
Cotação do euro	6,3	Estimativa
Créditos de Carbono, US\$/ton CO2		
Anos 1-2	7	BP
Anos 3-5	15	BP
Anos 6-8	30	BP
Anos 9-20	40	BP

Para cálculo dos custos fixos, foram estimados o custo com pessoal como o número de trabalhadores, custo com mão-de-obra, impostos, depreciação e condições de financiamento. Essas despesas serão consideradas anualmente sem alteração, pois não variam com a quantidade produzida. Os valores estão demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20: Quantidade e custos com pessoal, impostos, depreciação e condição de financiamento –

Custos com Pessoal		
Salário	100%	-
Encargos Trabalhistas	98%	Dados federais
Salário de Diretor (R\$/mês)	25.000	Estimativa
Salário de Engenheiro (R\$/mês)	20.000	Estimativa
Salário de Analista (R\$/mês)	5.000	Estimativa
Salário de Operador (R\$/mês)	6.000	Estimativa
Quantidade		
Diretor	1	Estimativa
Engenheiros	3	Estimativa
Analistas	6	Estimativa
Operadores	12	Estimativa
Impostos		
Imposto de Renda, ICMS, PIS e COFINS	0,00%	BP
Taxa de Atratividade	10,00%	-
Depreciação		
Máquinas e equipamentos (10 anos)	10,00%	Receita Federal
Construções (25 anos)	4,00%	Receita Federal
Deferidos (25 anos)	4,00%	Receita Federal
Condições de Financiamento		
Taxa de Juros, % a.a.	10,00%	BNDES RenovaBio
% Capital financiado	50,00%	BNDES RenovaBio
Pagamento Amortização, anos	10	BNDES RenovaBio
Carência, anos	2	BNDES RenovaBio

5. CÁLCULOS E RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Custos

Primeiramente, utilizando os dados referentes as correntes de alimentação, calculou-se o rendimento dos insumos em função da corrente de matéria-prima (% ton insumo/ton MP). Em seguida, utilizando a vazão desejada de 100.000 toneladas de produto por ano, calculou-se a vazão necessária de cada insumo utilizado nos dois processos. Em posse desses dados, calculou-se o preço por tonelada de cada insumo (R\$/ton). Todos os resultados estão detalhados na Tabela 21.

Tabela 21: Custos das plantas de produção de etanol e bioquerosene

Item	Rendimento (% ton/ton MP)	Vazão (ton/ano)	Preço (R\$/ton)
E2G biomassa	100,00%	1.267.427	R\$ 79,09
E2G ácido sulfúrico	4,59%	58.200	R\$ 1.468,48
E2G hidróxido de sódio	1,20%	15.200	R\$ 1.750,00
E2G levedura	1,50%	19.000	R\$ 1.890,00
BTL-FT biomassa	100,00%	686.020	R\$ 79,09
BTL-FT catalisador	0,00058%	4	R\$ 270.000,00

Utilizando as premissas obtidas na literatura, foi possível calcular os gastos com utilidades e serviços necessários para a produção anual de 100.000 toneladas de biocombustível referente a cada planta, que estão demonstrados na Tabela 22.

Tabela 22: Gasto com utilidades e serviços

Item	Valor
E2G Energia Elétrica, R\$/ton etanol	R\$ 178,71
E2G Manutenção, R\$/ton etanol	R\$ 17,00
BTL-FT Vapor, m ³ /ton bioQAv	R\$ 933,36
BTL-FT Energia Elétrica, R\$/ton bioQAv	R\$ 300,77
BTL-FT Manutenção, R\$/ton bioQAv	R\$ 17,00

5.2. Receitas

Para o cálculo das receitas, utilizou-se as premissas obtidas na literatura referente ao rendimento de cada produto, e calculou-se o rendimento dos subprodutos com valor agregado (lignina e nafta), assim como os valores de suas vazões (ton/ano). A partir dos valores de densidade, pode-se converter as vazões mássicas em volumétricas (m^3 /ano) e, com o preço de venda de cada produto, obter a receita anual de cada um deles (R\$/ano). Todos os valores estão descritos na Tabela 23.

Tabela 23: Receitas das plantas de produção de etanol e bioquerosene

Item	Rendimento (% ton/ton MP*)	Vazão (ton/ano)	Densidade (ton/ m^3)	Vazão (m^3 /ano)	Preço (R\$/ m^3)
BTL-FT Bioquerosene	14,58%	100.000	0,850	117.647	R\$ 5.000,00
BTL-FT Nafta	4,66%	32.000	0,702	45.584	R\$ 2.998,62
E2G Etanol	7,89%	100.000	0,789	126.743	R\$ 3.855,00
E2G Lignina	10,00%	126.743	0,663	191.165	R\$ 594,00

5.3. Investimentos

O investimento necessário para a implementação do processo de obtenção de ambos os combustíveis foi obtido no cálculo do CAPEX de cada planta, descrito no item 4.5.2. Os fatores para cálculo de investimentos foram retirados de CARVALHO, 2017; RICHES, 2007. Na Tabela 24, constam os fatores referentes ao percentual correspondente de cada investimento em relação ao total da planta, como tancagem, bombas, utilidades, equipamentos, sistema de combate a incêndio, construções, instalações e projeto. Com esses percentuais, calcula-se os valores detalhados de cada investimento realizado na planta.

Tabela 24: Tabela de investimentos para as plantas de etanol e bioquerosene

Maquinas e Equipamentos	Fator	Valor em mil R\$ (Etanol)		Valor em mil R\$ (Bioquerosene)	
Planta	-	R\$	437.167,80	R\$	799.200,00
Tancagem	10,0%	R\$	43.716,78	R\$	79.920,00
Bombas	0,3%	R\$	1.311,50	R\$	2.397,60
Utilidades	4,0%	R\$	17.486,71	R\$	31.968,00
Equipamentos de Laboratório	1,0%	R\$	4.371,68	R\$	7.992,00
Sistema Combate a incêndio	0,9%	R\$	3.934,51	R\$	7.192,80
Obras e civis e construções	9,0%	R\$	39.345,10	R\$	71.928,00
Instalações e Outros	3,0%	R\$	13.115,03	R\$	23.976,00
Engenharia e Projeto	1,0%	R\$	4.371,68	R\$	7.992,00

5.3.1. Depreciação

As taxas de depreciação são fixadas por meio de Instrução Normativa da Secretaria da Receita Federal do Brasil (RFB nº 1.700/2017) e variam de acordo ao bem material. Neste trabalho foram considerados depreciação igual a 10% para máquinas e equipamentos com tempo de vida útil de 10 anos e 4% para construções, instalações, diferidos e outros com tempo de vida útil de 25 anos. Os valores para a planta de etanol e de bioquerosene estão consolidados nas Tabela 25 e 26, respectivamente. Ambas apresentam os valores investidos no ano 0, e a depreciação nos primeiros 10 anos e nos anos 10 anos seguintes.

Tabela 25: Depreciação referente as máquinas, equipamentos, construções e instalações para planta de etanol

Depreciação (mil R\$)	Taxa	Ano 0	Ano 1 - 10	Ano 11 – 20
Máquinas e equipamentos	10,0%	R\$ 507.989	R\$ 50.799	-
Construções, instalações e outros	4,0%	R\$ 52.460	R\$ 2.098	R\$ 2.098
Diferido	4,0%	R\$ 4.372	R\$ 175	R\$ 175
Total		R\$ 564.821	R\$ 53.072	R\$ 2.273

Tabela 26: Depreciação referente as máquinas, equipamentos, construções e instalações para a planta de bioquerosene

Depreciação (mil R\$)	Taxa	Ano 0	Ano 1 - 10	Ano 11 – 20
Máquinas e equipamentos	10,0%	R\$ 928.670	R\$ 92.867	-
Construções, instalações e outros	4,0%	R\$ 95.904	R\$ 3.836	R\$ 3.836
Diferido	4,0%	R\$ 7.992	R\$ 320	R\$ 320
Total		R\$ 1.032.566	R\$ 97.023	R\$ 4.156

5.3.2. Financiamento

Para o financiamento de cada planta, foram considerados os valores oferecidos pelo BNDES para projetos no âmbito do programa RenovaBio. Este programa concede empréstimos a empresas produtoras de biocombustíveis para estimulá-las a melhorar sua eficiência energético-ambiental. Aquelas que, ao longo do período de pagamento dos empréstimos, alcançarem as metas de redução de emissão de CO₂ estipuladas pelo programa terão redução na taxa de juros (BNDES, 2021). Na Tabela 27 constam as condições detalhadas do financiamento de cada planta.

Tabela 27: Financiamento – Fonte: Elaboração própria com base nos dados de BNDES – (RenovaBio)

	Etanol	Bioquerosene
Investimento mil R\$	R\$ 564.821	R\$ 1.032.566
% BNDES	50,0%	50,0%
Taxa de juros	10,0%	10,0%
Prazo de pagamento da amortização (anos)	10	10
Prazo de carência (anos)	2	2

5.3.3. Pagamento da dívida

Com as condições de financiamento para cada planta, foi calculado 50% do custo do investimento para cálculo da dívida. Os juros são referentes a 10% do valor da dívida atual em cada ano. Nos dois primeiros anos, durante o período de carência, o valor total pago é igual ao valor dos juros, mantendo a dívida total estável. Após esse período, durante os 8 anos restantes, a dívida é paga da seguinte forma: total

da dívida dividido pelos anos restantes (8 anos) mais os juros restantes. Ao final dos 10 anos, a dívida de ambas as plantas estará quitada. Os valores estão descritos na Tabela 28, para a planta de etanol, e na Tabela 29 para a planta de bioquerosene.

Tabela 28: Detalhamento do pagamento da dívida anual da planta de etanol

Ano	Dívida (mil R\$)	Pagamento (mil R\$)	Principal (mil R\$)	Juros (mil R\$)	Dívida Final (mil R\$)
1	R\$ 282.410	R\$ 28.241	R\$ 0	R\$ 28.241	R\$ 282.410
2	R\$ 282.410	R\$ 28.241	R\$ 0	R\$ 28.241	R\$ 282.410
3	R\$ 282.410	R\$ 63.542	R\$ 35.301	R\$ 28.241	R\$ 247.109
4	R\$ 247.109	R\$ 60.012	R\$ 35.301	R\$ 24.711	R\$ 211.808
5	R\$ 211.808	R\$ 56.482	R\$ 35.301	R\$ 21.181	R\$ 176.506
6	R\$ 176.506	R\$ 52.952	R\$ 35.301	R\$ 17.651	R\$ 141.205
7	R\$ 141.205	R\$ 49.422	R\$ 35.301	R\$ 14.121	R\$ 105.904
8	R\$ 105.904	R\$ 45.892	R\$ 35.301	R\$ 10.590	R\$ 70.603
9	R\$ 70.603	R\$ 42.362	R\$ 35.301	R\$ 7.060	R\$ 35.301
10	R\$ 35.301	R\$ 38.831	R\$ 35.301	R\$ 3.530	R\$ 0

Tabela 29: Detalhamento do pagamento da dívida anual da planta de bioquerosene

Ano	Dívida (mil R\$)	Pagamento (mil R\$)	Principal (mil R\$)	Juros (mil R\$)	Dívida Final (mil R\$)
1	R\$ 516.283	R\$ 51.628	R\$ 0	R\$ 51.628	R\$ 516.283
2	R\$ 516.283	R\$ 51.628	R\$ 0	R\$ 51.628	R\$ 516.283
3	R\$ 516.283	R\$ 116.164	R\$ 64.535	R\$ 51.628	R\$ 451.748
4	R\$ 451.748	R\$ 109.710	R\$ 64.535	R\$ 45.175	R\$ 387.212
5	R\$ 387.212	R\$ 103.257	R\$ 64.535	R\$ 38.721	R\$ 322.677
6	R\$ 322.677	R\$ 96.803	R\$ 64.535	R\$ 32.268	R\$ 258.142
7	R\$ 258.142	R\$ 90.350	R\$ 64.535	R\$ 25.814	R\$ 193.606
8	R\$ 193.606	R\$ 83.896	R\$ 64.535	R\$ 19.361	R\$ 129.071
9	R\$ 129.071	R\$ 77.442	R\$ 64.535	R\$ 12.907	R\$ 64.535
10	R\$ 64.535	R\$ 70.989	R\$ 64.535	R\$ 6.454	R\$ 0

5.4. Projetos – Receitas e Custos totais

5.4.1. Custos totais

Para realizar o cálculo total de custos e receitas anuais das plantas, utilizamos as informações obtidas anteriormente e consolidamos por ano. Para os custos fixos, não há variação durante todo o período de avaliação e também não há diferenciação entre as plantas, visto que a mão de obra é a mesma, conforme demonstrado na Tabela 30.

Tabela 30: Custos fixos das plantas de etanol e bioquerosene no período de 20 anos

Custos Fixos	mil R\$/ano
Diretores	R\$ 644
Engenheiros	R\$ 1.544
Administrativos	R\$ 772
Operadores	R\$ 1.853
Sub-Total	R\$ 4.813

Somado aos custos fixos, entram os custos variáveis que incluem os gastos com insumos, utilidades e serviços. Apesar da matéria-prima ser a mesma, a quantidade necessária para cada processo é diferente, bem como os insumos e utilidades. Para o primeiro ano de operação, é desconsiderado uma parte dos gastos, visto que as plantas irão operar com 77% da capacidade total. Do segundo ano em diante, o custo variável será considerado fixo para fins de cálculo, tomando como base 100% da capacidade produtiva, mas esse valor poderá sofrer mudanças durante o período. Na Tabela 31, constam os dados referentes a planta de etanol, e na Tabela 32, os dados referentes a planta de bioquerosene.

Tabela 31: Custos variáveis referentes a planta de etanol

Custos variáveis	Ano 1	Ano 2-20
Matérias Primas e Insumos (mil R\$/ano)		
Bagaço de Malte	R\$ 77.182	R\$ 100.237
Ácido Sulfúrico	R\$ 65.808	R\$ 85.466
Hidróxido de sódio	R\$ 20.482	R\$ 26.600
Levedura	R\$ 27.651	R\$ 35.910
Utilidades e Serviços (mil R\$/ano)		
Energia Elétrica	R\$ 13.760	R\$ 17.871
Manutenção	R\$ 1.309	R\$ 1.700
Sub-total	R\$ 206.193	R\$ 267.783

Tabela 32: Custos variáveis referentes a planta de bioquerosene

Custos variáveis	Ano 1	Ano 2-20
Matérias Primas e Insumos (mil R\$/ano)		
Bagaço de Malte	R\$ 41.776	R\$ 54.255
Catalisador	R\$ 832	R\$ 1.080
Utilidades e Serviços (mil R\$/ano)		
Energia Elétrica	R\$ 23.159	R\$ 30.077
Manutenção	R\$ 1.309	R\$ 1.700
Sub-total	R\$ 67.076	R\$ 87.112

Então, somando os custos fixos e variáveis, temos o valor total de R\$ 211.006.000 para a planta de etanol, e o valor total de R\$ 71.890.000 para a planta de bioquerosene no primeiro ano de operação. Já para os anos seguintes, o custo total para a planta de etanol e bioquerosene se mantém constantes e iguais a R\$ 272.596.000 e R\$ 91.926.000, respectivamente.

5.4.2. Receitas totais

Para cálculo das receitas, utilizando os dados obtidos na seção 5.2 de vazão (m^3/ano) e o preço por ano (R\$/ano), calcula-se a receita total. A receita referente ao primeiro ano, é referente a 77% de produção frente a capacidade total, que impacta diretamente o total obtido com etanol e lignina nesse período. Nos anos seguintes, os valores de receita referente ao etanol e a lignina se repetem. No entanto, o crédito de carbono é variável entre os períodos de 1-2, 3-5, 6-8 e 9-20 anos, conforme demonstrado na Tabela 33 para o etanol e na Tabela 34 para o bioquerosene.

Tabela 33: Receitas totais da planta de etanol

Receitas (mil R\$)	Ano 1	Ano 2	Ano 3-5	Ano 6-8	Ano 9-20
E2G / Etanol	R\$ 376.217	R\$ 488.593	R\$ 488.593	R\$ 488.593	R\$ 488.593
E2G / Lignina	R\$ 87.435	R\$ 113.552	R\$ 113.552	R\$ 113.552	R\$ 113.552
Créditos de Carbono E2G	R\$ 6.032	R\$ 7.834	R\$ 16.786	R\$ 33.572	R\$ 44.763
Total	R\$ 469.684	R\$ 609.979	R\$ 618.932	R\$ 635.718	R\$ 646.909

Tabela 34: Receitas totais da planta de bioquerosene

Receitas (mil R\$)	Ano 1	Ano 2	Ano 3-5	Ano 6-8	Ano 9-20
BTL-FT BioQav	R\$ 452.941	R\$ 588.235	R\$ 588.235	R\$ 588.235	R\$ 588.235
BTL-FT Nafta	R\$ 105.251	R\$ 136.689	R\$ 136.689	R\$ 136.689	R\$ 136.689
Créditos Carbono BtL-FT	R\$ 7.944	R\$ 10.317	R\$ 22.108	R\$ 44.216	R\$ 58.955
Total	R\$ 566.136	R\$ 735.242	R\$ 747.033	R\$ 769.141	R\$ 783.880

5.5. Demonstração de resultados

Com as receitas líquidas de ambas as plantas, descontando os custos totais, obtemos o EBITDA, que é um termo em inglês para um indicador financeiro, onde sua tradução é lucro antes dos juros, impostos, depreciação e amortização. Ao realizar o desconto da depreciação e dos encargos financeiros (juros), é obtido o lucro (prejuízo) líquido. Na Tabela 35, está detalhada toda a demonstração da planta de etanol, e na Tabela 36, toda demonstração da planta de bioquerosene.

Tabela 35: Demonstração de resultados (mil R\$/ano) da planta de etanol

Demonstração de resultados (mil R\$/ano)	Ano 1	Ano 2	Ano 5	Ano 10	Ano 11-20
(=) Receitas Líquidas	R\$ 469.684	R\$ 609.979	R\$ 618.932	R\$ 646.909	R\$ 646.909
(-) Custos totais	R\$ 211.006	R\$ 272.596	R\$ 272.596	R\$ 272.596	R\$ 272.596
EBITDA	R\$ 258.678	R\$ 337.383	R\$ 346.335	R\$ 374.312	R\$ 374.312
(-) Depreciação	R\$ 53.072	R\$ 53.072	R\$ 53.072	R\$ 53.072	R\$ 2.273
(-) Encargos financeiros (juros)	R\$ 28.241	R\$ 28.241	R\$ 21.181	R\$ 3.530	R\$ 0
Lucro (prejuízo) líquido	R\$ 177.364	R\$ 256.070	R\$ 272.082	R\$ 317.710	R\$ 372.039

Tabela 36: Demonstração de resultados (mil R\$/ano) da planta de bioquerosene

Demonstração de resultados (mil R\$/ano)	Ano 1	Ano 2	Ano 5	Ano 10	Ano 11-20
(=) Receitas Líquidas	R\$ 566.136	R\$ 735.242	R\$ 747.033	R\$ 783.880	R\$ 783.880
(-) Custos totais	R\$ 71.890	R\$ 91.926	R\$ 91.926	R\$ 91.926	R\$ 91.926
EBITDA	R\$ 494.246	R\$ 643.316	R\$ 655.107	R\$ 691.954	R\$ 691.954
(-) Depreciação	R\$ 97.023	R\$ 97.023	R\$ 97.023	R\$ 97.023	R\$ 4.156
(-) Encargos financeiros (juros)	R\$ 51.628	R\$ 51.628	R\$ 38.721	R\$ 6.454	R\$ 0
Lucro (prejuízo) líquido	R\$ 345.595	R\$ 494.665	R\$ 519.363	R\$ 588.478	R\$ 687.798

5.6. Indicadores financeiros

Nas seções anteriores foram apresentadas todas as premissas consideradas, cálculos realizados e os resultados obtidos em relação aos investimentos e retornos financeiros das plantas de produção de etanol de segunda geração e bioquerosene. Nesta seção serão apresentados indicadores financeiros que tornam possível uma melhor interpretação dos resultados obtidos e auxiliam na tomada de decisão de realizar ou não um investimento.

O primeiro indicador a ser abordado é o Valor Presente Líquido (VPL) e é uma métrica utilizada para saber se um investimento que se pretende fazer possui

viabilidade ou não. O VPL é o valor (expresso em reais) que se obtém quando se traz a série de fluxo de caixa distribuída ao longo período analisado (20 anos) para o momento atual, considerando nesse cálculo a taxa de atratividade do negócio. Ou seja, esse indicador permite uma estimativa do lucro sobre um investimento e descobrir se o projeto avaliado é viável ou não.

Uma outra métrica a ser considerada nessa avaliação econômica é a Taxa Interna de Retorno (TIR). Ela é uma taxa de desconto hipotética e, assim como o VPL, é utilizada para indicar se um projeto é atrativo economicamente ou não. Seu cálculo é realizado considerando o valor presente líquido igual a zero, ou seja, igualando os fluxos de caixa positivos gerados pelo projeto e o investimento e necessidades de capital exigidas por ele. Assim, investir no projeto seria equivalente a investir em outra aplicação, com mesmo nível de risco, que rendesse uma taxa de juros igual à TIR.

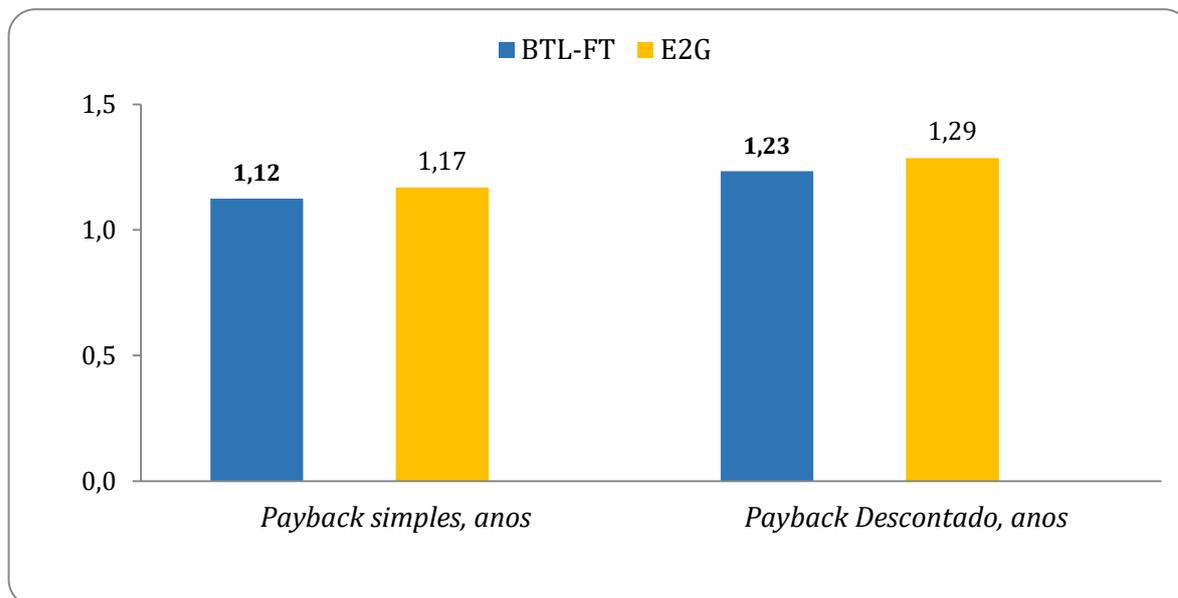
Por fim, o terceiro indicador a ser avaliado é o *Payback*, que é uma das metodologias mais simples de análise de investimentos. Trata-se de uma estimativa tempo para que se obtenha o retorno sobre um valor investido. Foram consideradas duas formas de cálculo desse indicador: sem descontar os fluxos de caixa futuros, chamado de *Payback Simples*; e considerando a taxa de atratividade do negócio, ou seja, trazendo a valor presente os valores futuros de fluxo de caixa. Esse último é conhecido como *Payback Descontado*.

Todos esses indicadores calculados para os projetos avaliados estão demonstrados na Tabela 36. Na Figura 13, temos o comparativo entre o *Payback Simples* e *Descontado* das duas plantas em análise.

Tabela 37: VPL, TIR e Payback das plantas de etanol e bioquerosene

Indicadores Financeiros	Etanol	Bioquerosene
VPL (Valor Presente Líquido) mil R\$	R\$ 2.475.253	R\$ 4.644.625
TIR (Taxa Interna de Retorno) %	81,8%	85,3%
Payback simples, anos	1,17 anos	1,12 anos
Payback descontado, anos	1,29 anos	1,23 anos

Figura 13: Comparativo entre o *payback* simples e descontado das plantas de etanol e bioquerosene



A partir dos dados apresentados acima, é possível notar que o valor presente líquido para os dois projetos (E2G e Bioquerosene) apresentam valores positivos, ou seja, as receitas serão maiores que as despesas no período avaliado (20 anos). Essa resposta positiva indica que, para ambas as situações, o investimento é viável e o investidor terá ganhos financeiros, havendo valorização do dinheiro aplicado. Apesar de ter sido observado um VLP maior para o projeto de planta de bioquerosene do que para o da planta de etanol (aproximadamente o dobro), não é possível tirar conclusões apenas comparando esses valores, visto que é necessário levar em conta também o valor investido em cada um dos projetos (investimento para bioquerosene também foi o dobro do que para etanol). Assim, é imprescindível que sejam avaliados os demais indicadores financeiros (TIR e *Payback*) para que se possa chegar à conclusão de qual planta em análise possui maior viabilidade econômica.

Dito isso, em relação a taxa interna de retorno obtida para os dois projetos, pode-se observar que em ambos os casos ela se mostra próxima a 80%, sendo a obtida para o projeto para o Bioquerosene ligeiramente maior do que a do E2G. O valor calculado é interpretado como o desconto que precisaria ser aplicado ao fluxo de caixa para que o investimento nesses projetos resultasse em um VPL igual a zero, ou seja, para que não houvesse nem lucro nem prejuízo no investimento. Se o resultado obtido para a TIR fosse menor do que a taxa de atratividade considerada

nesse estudo (10%), seria mais indicado investir em um ativo mais seguro e com uma rentabilidade potencial maior. Como em ambos os casos a TIR calculada é 8 vezes maior do que a taxa de atratividade assumida, ambos os investimentos são atrativos. E, como o valor da TIR encontrado para o projeto de planta de obtenção de bioquerosene é maior do que o da planta de etanol de segunda geração, pode-se dizer que o primeiro é mais rentável do que o segundo.

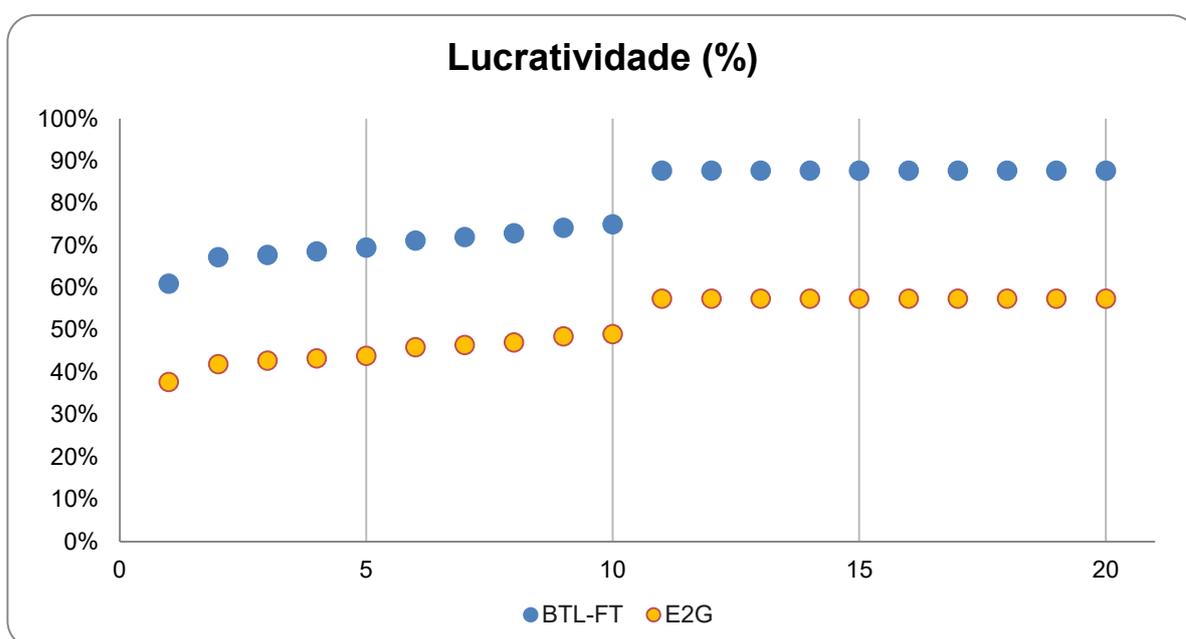
No que se refere ao *Payback* Simples e Descontado calculados, observa-se que para ambos os projetos o retorno sobre o valor investido é obtido em menos de um ano e meio. Sabendo que o risco do investimento está associado à sua liquidez, quanto menor o valor de *Payback*, menores serão as chances de prejuízo para o investidor. Com isso, pode-se dizer que ambos os projetos são seguros em relação ao retorno de investimentos, visto que o tempo para que esse retorno aconteça é consideravelmente menor do que a vida útil dos equipamentos utilizados nas plantas (ativos imobilizados). Como o *Payback* obtido para o projeto de bioquerosene é ligeiramente menor do que o do projeto de etanol, este se torna mais atrativo em relação ao tempo de retorno do investimento.

5.1. Lucratividade

A lucratividade é um indicador que avalia o ganho de uma empresa em relação à atividade que ela desempenha. Seu cálculo é realizado através do lucro líquido (lucro após deduções de custos e despesas) e da receita bruta. Esse indicador é apresentado sob forma de porcentagem e, de maneira geral, quanto maior o seu valor, melhor é o negócio. Os dados de lucratividade obtidos para os dois projetos ao longo do período avaliado estão descritos na Tabela 38. A partir do Figura 14, é possível ter uma melhor perspectiva e comparar a diferença de lucratividade obtidos em ambos os investimentos.

Tabela 38: Lucratividade (%) ao longo dos anos (1-20) para as plantas de etanol e bioquerosene

Anos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-20
E2G	37,8%	42,0%	42,8%	43,4%	44,0%	46,0%	46,6%	47,1%	48,6%	49,1%	57,5%
BTL-FT	61,0%	67,3%	67,8%	68,7%	69,5%	71,2%	72,1%	72,9%	74,2%	75,1%	87,7%

Figura 14: Comparativo entre a lucratividade (%) da planta de etanol e bioquerosene

Como é possível notar, a lucratividade para ambos os projetos de produção de biocombustível apresenta um crescimento próximo a 10% nos dez primeiros anos de operação das plantas. Onde a lucratividade da planta de etanol parte de uma lucratividade igual a 37,8% no primeiro ano para 49,1% no décimo ano, enquanto a da planta de bioquerosene parte de 61,0% para 75,1%. Do décimo para o décimo primeiro ano de operação, ambos os projetos apresentam um salto de, aproximadamente, 10% e, mantêm os valores constantes pelos anos seguintes.

Comparando os dois projetos, percebe-se que a lucratividade da planta de bioquerosene é superior à da planta de etanol durante todo o período analisado. A diferença entre elas variou de 23,2% a 26,0% nos dez primeiros anos e foi constante e igual a 30,2% nos anos seguintes. Isso indica que, em relação a capacidade do

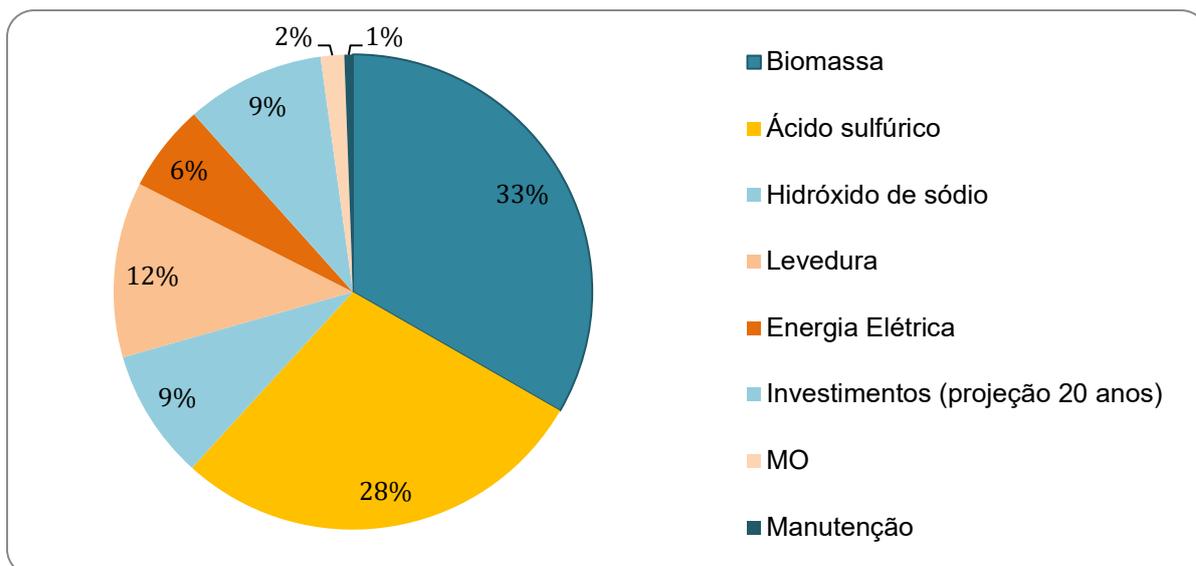
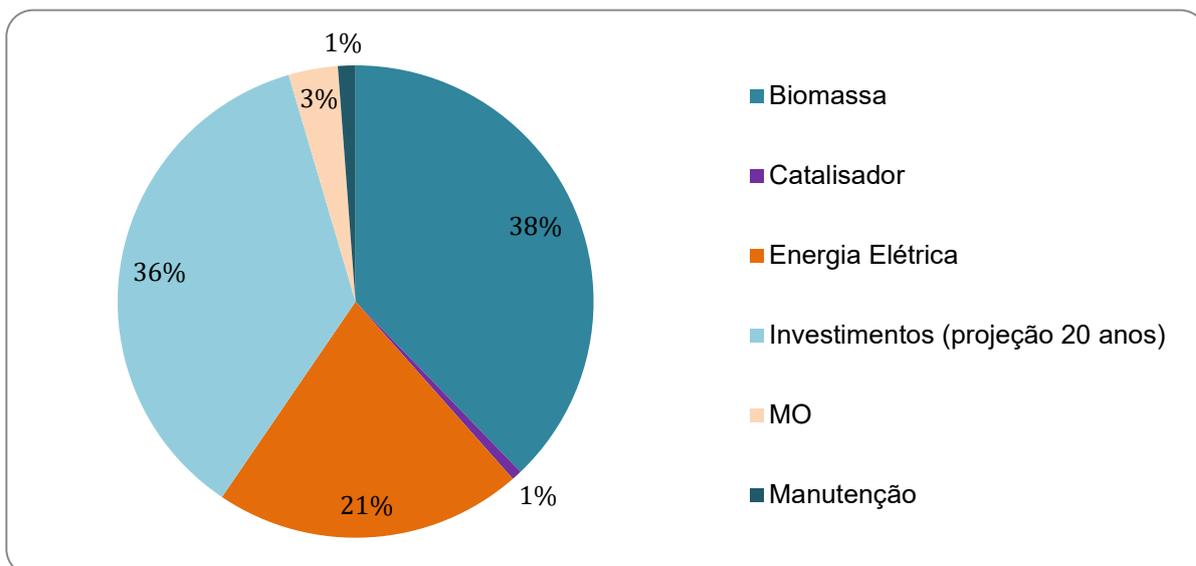
investimento em gerar lucro a partir de suas atividades operacionais, o projeto de planta para obtenção de bioquerosene se mostra mais indicado para investimento.

5.2. Divisão de custos

Com todos os dados calculados anteriormente, é possível descrever a representatividade dos itens considerados nos custos de cada planta, comparado ao valor (por litro) de cada produto. O preço por litro e o percentual correspondente está exemplificado na Tabela 39. As Figuras 15 e 16 ilustram a divisão de custos de cada planta.

Tabela 39: Divisão de custos das plantas de etanol e bioquerosene

Divisão de Custos	Etanol 2G		BTL-FT	
	R\$/litro	%	R\$/litro	%
Biomassa	R\$ 0,79	33,3%	R\$ 0,46	37,8%
Catalisador	-	0,0%	R\$ 0,01	0,7%
Ácido sulfúrico	R\$ 0,67	28,4%	-	0,0%
Hidróxido de sódio	R\$ 0,21	8,8%	-	0,0%
Levedura	R\$ 0,28	11,9%	-	0,0%
Energia Elétrica	R\$ 0,14	5,9%	R\$ 0,26	21,0%
Investimentos (projeção 20 anos)	R\$ 0,22	9,4%	R\$ 0,44	36,0%
MO	R\$ 0,04	1,6%	R\$ 0,04	3,4%
Manutenção	R\$ 0,01	0,6%	R\$ 0,01	1,2%
Frete	-	0,0%	-	0,0%
Custo Produção CIF	R\$ 2,37	100,0%	R\$ 1,22	100,0%

Figura 15: Divisão de custos da planta de etanol**Figura 16:** Divisão de custos da planta de bioquerosene

Analisando os gráficos acima, constata-se que a biomassa (bagaço de malte) e o ácido sulfúrico utilizados na planta de produção de etanol são os custos que mais impactam no valor final do biocombustível, com 33% e 28%, respectivamente. Em relação à planta de bioquerosene, observa-se que o bagaço também exerce a maior influência (46%) no que diz respeito ao preço final do combustível, seguido pela contribuição dos investimentos (44%) realizado na planta durante os 20 anos de operação e pela energia elétrica (26%) utilizada para conversão da matéria-prima em produto.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo buscou analisar a viabilidade econômica da utilização de bagaço de malte, resíduo da indústria cervejeira, como matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração e bioquerosene de aviação a partir de processos químicos.

Com base nas condições operacionais e nas premissas monetárias estabelecidas neste trabalho, confeccionou-se uma análise de viabilidade econômica estruturada através da qual obteve-se como resultado indicadores financeiros que demonstram qual investimento/empreendimento possui maior grau de atratividade. Para tal, foram avaliados os indicadores de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* e o Índice de Lucratividade dos negócios em análise.

Dessa forma, após análise conjunta de todas as métricas supracitadas, chegou-se à conclusão, dentre as duas opções de negócio, que o investimento na planta de produção de bioquerosene é aquele que trará maiores ganhos e menos riscos. Isso porque ele se mostrou superior em todos os fatores mensurados: VPL positivo e superior ao calculado para o projeto de produção de Etanol 2G; Taxa de Retorno Interna igual a 85,3% (superior em 2,5% ao valor encontrado para o E2G), menor *Payback* e maior lucratividade no período analisado (20 anos). Em conjunto, esses indicadores evidenciam que o projeto de produção do biocombustível de aviação trará um retorno do investimento em menor tempo e em maior proporção, quando comparado ao projeto de obtenção de etanol. Além disso, esse projeto apresentou maior capacidade em gerar lucro a partir de suas atividades operacionais.

Vale destacar que, a partir dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se considerar viável e atrativa a utilização de bagaço de malte oriundo da indústria cervejeira como matéria-prima para obtenção de produtos de maior valor agregado.

Por fim, convém ressaltar a originalidade do presente trabalho, visto que a proposta apresentada aqui não foi encontrada em literaturas anteriores em grau de similaridade relevante em relação às premissas econômicas e condições operacionais aqui avaliadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBOR, V. B. et al. Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. **Biotechnology Advances**, v. 29, 675–685, 2011.

AGUIAR, H. R. R. **Produção de etanol de segunda geração**. Monografia - Curso Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

ALVIRA, P. et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. **Bioresource Technology**, v. 101, 4851–4861, 2010.

BALAT. M. Global Bio-fuel Processing and Production Trends. **Energy exploration & exploitation**, v. 25, nº 3, 195–218, 2007.

BEHERA, S. et al. Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, 91–106, 2014.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SOCIAL. BASTOS, V. D. **Etanol, álcoolquímica e biorrefinarias**. Rio de Janeiro, 2007. (BNDES Setorial, nº 25, 5-38).

BORGES, M.S.; SOUZA NETO, S. P. **Parceria entre o setor cervejeiro e o pecuarista leiteiro: um estudo de caso**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 2009.

BORGES, V. S. **Obtenção de hidrocarbonetos na faixa do bioquerosene de aviação “drop in” por hidroxidação (HDO) do óleo de babaçu**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

BOUGRIER, C. et al. Anaerobic digestion of Brewery Spent Grains: Trace elements addition requirement. **Bioresource Technology**, v. 247, 1193-1196, 2018.

BP - BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy**. 67th edition, Londres, 2018.

BP - BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy**. 68th edition, Londres, 2019.

BRODEUR, G. et al. Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review. **Enzyme Research**, v. 2011, ID 787532, 2011.

CARDONA, C. A.; QUINTERO, J. A.; PAZ, I. C. Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 101, 4754–4766, 2010.

CARVALHO, F. M. **Evaluation of the brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

CASELLA, G.S. et al. **Reaproveitamento do bagaço de malte na indústria alimentícia**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte.

CHANDEL, A. K. et al. Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. **Biofuels, Bioprod. Bioref.**, v. 13, ed. 4, 994-1014, 2019.

CHAUDHARY, G. et al. Alkaline pretreatment methods followed by acid hydrolysis of *Saccharum spontaneum* for bioethanol production. **Bioresource Technology**, v. 124, 111-118, 2012.

CHEN, M. et al. U.S. Biofuels Industry: A Critical Review of Opportunities and Challenges. **BioProducts Business**, v.4, 42–59, 2016.

CORDEIRO, L. G. **Caracterização e viabilidade econômica do bagaço de malte oriundo de cervejarias para fins energéticos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2011.

CORDEIRO, L. G; EL-AOUAR, A. A.; GUSMÃO, R. P. Caracterização do bagaço de malte oriundo de cervejarias. **Revista Verde**, v. 7, n. 3, 20-22, 2012.

CORTEZ, L. A. B. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora UNICAMP, 2008.

COSTA, A. D. et al. Composição química e energia digestível do bagaço de malte em suínos machos nas fases de crescimento e terminação. **Anais da Jornada de Iniciação Científica**, Seropédica, RJ, 2006.

CROSATTI, B. C. B. **Produção de etanol de segunda geração a partir de embalagem cartonada longa vida**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

DEMIRBAS, A. The social, economic, and environmental importance of biofuels in the future. **Energy Sources, part b: economics, planning, and policy**, v. 12, no. 1, 47–55, 2017.

DIAS, M. O. S. et al. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research and Design**, v.87,1206–1216, 2009.

DIAS, M. O. S. et al. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? **Bioresource Technology**, v. 102, 8964–8971, 2011.

EMBRAER – EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA S/A. **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no brasil: plano de ação**. São Paulo, 2013.

EMBRAPA. Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios. Embrapa, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3344909/artigo-materiasprimas-oleaginosas-para-a-producao-de-bioquerosene--oportunidades-e-desafios>> Acesso em: 15 de junho de 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional – Relatório Síntese / Ano Base 2019**. Rio de Janeiro, 2020.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA / MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2019.

ETENE – ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE. **Caderno Setorial - Produção e Uso de Biocombustíveis no Brasil**. 2019.

FIRJAN. Quanto custa a energia elétrica. Firjan, 2017. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-aenergia-eletrica.htm>> Acesso em: 14 de junho de 2021.

GAURAV, N. et al. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, 205-214, 2017.

GIRAFÁ, C. B.; PAIVA, J. F. V.; DEIRÓ, L. B. A. **Avaliação econômica comparativa entre as rotas HEFA, ATJ e Fischer-Tropsch para produção de Bioquerosene**. Projeto final - Curso Engenharia Química. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

GÍRIO, F. M. et al. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. **Bioresource Technology**, v. 101 4775–4800, 2010.

GROSSI, E. C. **Produção de etanol de segunda geração a partir de um derivado de celulose**. Dissertação de Mestrado. o Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Química e Biológica do Instituto de Química. Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

GUELL, B. M. et al. Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation. **SINTEF Energy Research**. Norway, 2012.

GURGEL, L. V. A. **Hidrólise ácida de bagaço-de-cana: estudo cinético de sacarificação de celulose para produção de etanol**. Tese de Doutorado. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

HAMELINCK, C. N.; HOOIJDONK, G. FAAIJ, A. PC. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, 384–410, 2005.

HIDENO, A. et al. Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw. **Bioresource Technology**, v. 100, 2706–2711, 2009.

HILTUNEN, J. et al. Using a low melting solvent mixture to extract value from wood biomass. **Nature**, v.6, nº 32420, 2016.

HO, P. D.; NGO, H. H.; GUO, W. A mini review on renewable sources for biofuel. **Bioresource Technology**, v. 169, 742-749, 2014.

HOWARD, R. L. et al. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. **African Journal of Biotechnology**, v. 2, nº 12, 602-619, 2003.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key Electricity Trends**. Paris, 2018.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. Paris, 2020.

KUHAD, R. C.; GUPTA, R.; SINGH, A. Microbial Cellulases and Their Industrial Applications. **Enzyme Research**, V. 2011, 280696, 2011.

KUMARI, D.; SINGH, R. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, 877-891, 2018.

LEAL, S. K. M. J. **Estudo prospectivo sobre as matérias-primas oleaginosas utilizadas na produção do bioquerosene de aviação e avaliação da logística de implantação de uma biorrefinaria**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020.

LEE, J. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. **Journal of Biotechnology**, v. 56, 1–24, 1997.

LINHARES, L. L. **Avaliação do potencial de aproveitamento do bagaço de malte cervejeiro para obtenção de xarope de glicose**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

LORENZI, B. R.; ANDRADE, T. H. N. O etanol de segunda geração no brasil: políticas e redes sociotécnicas. **Rev. Bras. Ci. Soc.**, v. 34, nº100, 2019.

MAIONE, N. R. **Pré-tratamento hidrotérmico do bagaço de malte (bsg) visando a produção de etanol de segunda geração**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação Engenharia Química. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2019.

MANYUCHI, M. M.; MUGANU, C. Techno-economic analysis for bio-ethanol production from waste corn stover as a value addition strategy. **Science, Engineering and Technology**, 1-4, 2015.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Anuário da Cerveja**. Brasília, 2020.

MARTINS, C. Z. **Avaliação da produção de etanol de segunda geração**. Monografia – Curso Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. J. Chemical characterization of brewer's spent grains and evaluation of its potential for obtaining value-added products. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, nº 1, 83-91, 2020.

MCMILLAN, J. D. **Pretreatment of Lignocellulosic Biomass**. ACS Symposium Series - American Chemical Society. Washington, 1994.

MELLO, L. R. P.F.; VERGÍLIO, R. M.; MALI, S. Caracterização química e funcional do resíduo fibroso da indústria cervejeira. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 2, nº 3, 191-194, 2013.

MENON, V.; RAO, M. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, 522-550, 2012.

MOHR, A.; RAMAN, S. Lessons from first generation biofuels and implications for the sustainability appraisal of second generation biofuels. **Energy Policy**, v. 63, 114-122, 2013.

MOOD, S. H. et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, 77–93, 2013.

MORO, M. K. **Pré-tratamento da biomassa de cana-de-açúcar por extrusão com dupla-rosca**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **Journal of Cereal Science**, v. 43, 1–14, 2006.

NAZARI, M.T. et al. Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, 11139-11156, 2021.

NEUREITER, M. et al. Dilute-Acid Hydrolysis of Sugarcane Bagasse at Varying Conditions. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 98–100, 2002.

NISHIYAMA, Y.; LANGAN, P.; CHANZY, H. Crystal Structure and Hydrogen-Bonding System in Cellulose I α from Synchrotron X-ray and Neutron Fiber Diffraction. **J. Am. Chem. Soc.**, v. 124, n $^{\circ}$ 31, 2002.

OLSON, D. G. et al. Recent progress in consolidated bioprocessing. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, 1–10, 2011.

PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, 69-80, 2000.

PINHEIRO, T. ET AL. Intensifying ethanol production from brewer's spent grain waste: Use of whole slurry at high solid loadings. **New Biotechnology**, v. 53, n $^{\circ}$ 25, 1-8, 2019.

RAFIEE, A.; HILLESTAD, M. Synthesis Gas Production Configurations for Gas-to-Liquid Applications. **Chem. Eng. Technol.** v. 35, n $^{\circ}$ 5, 870–876, 2012.

RAMOS, L. P. et al. Tecnologias de Produção de Biodiesel. **Rev. Virtual Quim.**, v. 3, n $^{\circ}$ 5, 385-405, 2011.

RODRIGUES, C. P.; CAMARGO, J. A. **Bagaço de cana-de-açúcar como potencial para cogeração de energia elétrica e etanol celulósico**. São Joaquim da Barra: Colégio Iara Coimbra, 2008.

RODRIGUES, F. A. **Avaliação da tecnologia de hidrólise ácida de bagaço de cana.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

ROITMAN, T. **Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, F. R. S. **Produção e caracterização de celulases e hemicelulases por linhagens fúngicas mesófilas isoladas do cerrado sul-mato-grossense.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade De Federal Da Grande Dourados. Dourados, 2014.

SANTOS, N. A. V. et al. Rejeitos de biomassas oriundas da cadeia de biocombustíveis no Brasil: Produção de bio-óleo e sub-produtos. **Rev. Virtual de Química**, v. 9, nº 1, 52-72, 2016.

SENNA, P. P. **Etanol de primeira ou de segunda geração? Uma comparação entre os ciclos produtivos.** Trabalho Acadêmico. Universidade Estadual Paulista – Departamento de Economia. São Paulo, 2016.

SHAOCHUN, M. **Economies of scale analysis and location studies for fuel ethanol refineries.** Dissertation. University of Illinois. Illinois, 2012.

SILVA, A. A. **Otimização do pré-tratamento ácido de torta de caroço de algodão e bagaço de malte com farinha de pupunha para produção de bioetanol de segunda geração.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Diamantina, 2012.

SILVA, C. F. L. et al. Potential of giant reed (*Arundo donax* L.) for second generation ethanol production. **Electronic Journal of Biotechnology**, 2014.

SILVA, E. S.; TRINCA, L. A.; NERY, J. T. Áreas espacialmente homogêneas de níveis de precipitação nas regiões sudeste e sul do Brasil. **Revista Energia na Agricultura**, v. 24, nº 3, 34-59, 2009.

SILVA, F. V. Panorama e perspectivas do etanol lignocelulósico. **Revista Liberato**, v.13, nº 20, 2012.

SILVA, J. R.F. et al. Treatment with compressed liquefied petroleum gas and ultrasound to improve cellulase activity. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 2, 102–107, 2013.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource Technology**, v. 83, 1–11, 2002.

TAGOMORI, I. S. **Potencial técnico e econômico para a produção de fischertropsch diesel a partir de biomassa (ft-btl) associada à captura de carbono no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

TAHERZADEH, M.; KARIMI, K. Enzyme-hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. **BioResources**, v. 2, nº 4, 707-738, 2007.

TANG, D.S. et al. Recovery of protein from brewer's spent grain by ultrafiltration. **Biochemical Engineering Journal**, v. 48, 1–5, 2009.

TEIXEIRA, L. C.; LINDEN, J. C.; SCHROEDER, H. A. Simultaneous Saccharification and Cofermentation of Peracetic Acid–Pretreated Biomass. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 84–86, 2000.

TERAMOTO, Y.; LEE, S-H.; ENDO, T. Pretreatment of woody and herbaceous biomass for enzymatic saccharification using sulfuric acid-free ethanol cooking. **Bioresource Technology**, v. 99, 8856–8863, 2008.

VERDE, A. A. et al. Destino sustentável de resíduos de cervejaria artesanal: Um estudo de caso em uma granja de suínos. **Revista Valore**, v. 4, 84-93, Volta Redonda, 2019.

VIANNA, L. S. **Avaliação do Potencial dos Resíduos Lignocelulósicos da Indústria de Celulose para a Produção de Etanol de Segunda Geração via Rotas Químicas**. Monografia - Curso Química Industrial. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

VILT, J. F. **O atual cenário dos combustíveis alternativos na aviação mundial**. Monografia – Curso Ciências Aeronáuticas. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça, 2017.

WINGREN, A.; GALBE, M.; ZACCHI, G. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. **Biotechnol. Prog.**, v. 19, 1109–1117, 2003

XIANG, Q.; KIM, J. S.; LEE, Y. Y. A Comprehensive Kinetic Model for Dilute-Acid Hydrolysis of Cellulose. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 105–108, 2003.

ZHANG, S. et al. Alkali combined extrusion pretreatment of corn stover to enhance enzyme saccharification. **Industrial Crops and Products**, v. 37, 352–357, 2012.