

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

VICTOR HUGO XAVIER BERNARDES

ETANOL A PARTIR DO MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E
QUESTÕES AMBIENTAIS

Uberlândia
2023

VICTOR HUGO XAVIER BERNARDES

**ETANOL A PARTIR DO MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E
QUESTÕES AMBIENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Sarah Arvelos Altino

Uberlândia

2023

Inserir ficha catalográfica

VICTOR HUGO XAVIER BERNARDES

ETANOL A PARTIR DO MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E QUESTÕES AMBIENTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Uberlândia, 30 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Sarah Arvelos Altino – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Rubens Gedraite – FEQUI/UFU

Eng. Me. Paulo Henrique Ramos Silva – PPGEQ/FAPEMIG/UFU

Dedico este trabalho a todas as pessoas que,
de alguma maneira, iluminaram meu caminho
durante esta jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

A minha família, por me proporcionar esta oportunidade e por sempre me apoiar em todas as minhas decisões e nos momentos difíceis.

A todos os colegas e amigos que, de alguma maneira, me apoiaram, compartilharam ideias e ajudaram a superar os meus desafios. Suas companhias tornaram os dias mais leves e as noites mais animadas.

À minha orientadora, Prof. Dra. Sarah Arvelos Altino, pela compreensão, disponibilidade e apoio durante todo o período de elaboração do TCC.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu desenvolvimento ao longo dessa jornada acadêmica. Cada um de vocês desempenhou um papel importante, e por isso, expresso a minha sincera gratidão.

“Em algum lugar, alguma coisa incrível
está esperando para ser descoberta.”

Carl Sagan

RESUMO

O impacto global gerado pela Crise do Petróleo desencadeou uma série de políticas em busca de fontes energéticas alternativas. Diante dessa situação, o etanol, antes visto como subproduto das indústrias açucareiras, emergiu como um promissor substituo da gasolina no Brasil. As infraestruturas estabelecidas, o conhecimento na fabricação de álcool industrial e a capacidade ociosa foram fatores para reconhecer seu papel estratégico e estimular sua produção pelo Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Devido às condições climáticas favoráveis, alta produtividade da cana-de-açúcar e eficiência inigualável do processo, o país tornou-se pioneiro e assumiu um papel de destaque como produtor de etanol. No entanto, a baixa durabilidade da cana-de-açúcar após o corte e o longo período de entressafra apresentam desafios e capacidade ociosa. Na região Centro-Oeste, principal produtora de grãos do país, também surgiram dificuldades relacionadas à alta produção, armazenamento, escoamento e instabilidade nos preços do milho. Diante desses obstáculos em ambos os setores, surgiu a primeira planta de etanol de milho no Brasil, sendo do tipo *Flex*, aproveitando o excedente nos períodos ociosos de produção de etanol da cana-de-açúcar. Posteriormente, surgiram as plantas do tipo *Full*, totalmente dedicadas ao uso do milho como matéria-prima, e *Full Flex*, que utilizam ambas as fontes paralelamente. O uso do milho apresenta várias vantagens, devido às múltiplas safras ao longo do ano, garantindo o abastecimento constante da planta e a diversificação de mercado com subprodutos como óleo e grãos de destilaria, utilizados principalmente na nutrição animal. A produção de etanol compartilha conceitos comuns entre a cana-de-açúcar e o milho, mas difere conforme a fonte de carboidratos, exigindo adaptações, como secagem, moagem, cozimento e liquefação, para garantir a fermentação, além de alterar as condições de operação. A implementação relativamente recente desse novo modelo industrial levanta questões sobre os impactos ambientais, sejam positivos ou negativos, e como podem contribuir para a redução da pegada de carbono. O presente estudo propõe-se a analisar as tecnologias e questões ambientais envolvidas no processo produtivo de obtenção de etanol anidro a partir do milho.

Palavras-chave: Etanol; Milho; Biocombustível; Processo produtivo; Questões Ambientais.

ABSTRACT

The global impact generated by the Oil Crisis triggered a series of policies in search of alternative energy sources. In this situation, ethanol, once seen as a byproduct of sugar industries, emerged as a promising substitute for gasoline in Brazil. Established infrastructures, knowledge in industrial alcohol production, and idle capacity were factors that recognized its strategic role and stimulated its production by the National Alcohol Program (Proálcool). Due to favorable climatic conditions, high productivity of sugarcane, and unparalleled efficiency of the process, the country became a pioneer and assumed a prominent role as an ethanol producer. However, the low durability of sugarcane after harvesting and the long offseason pose challenges and idle capacity. In the Midwest region, the country's main grain producer, difficulties related to high production, storage, transportation, and instability in corn prices also emerged. Faced with these obstacles in both sectors, the first corn ethanol plant in Brazil appeared, of the Flex type, taking advantage of the surplus during idle periods of sugarcane ethanol production. Subsequently, plants of the Full type emerged, entirely dedicated to using corn as a raw material, and Full Flex, which use both sources simultaneously. The use of corn brings several advantages due to multiple harvests throughout the year, ensuring a constant supply to the plant and market diversification with byproducts such as oil and distillery grains, primarily used in animal nutrition. Ethanol production shares common concepts between sugarcane and corn but differs according to the carbohydrate source, requiring adaptations such as drying, milling, cooking, and liquefaction to ensure fermentation, as well as altering operating conditions. The relatively recent implementation of this new industrial model raises questions about environmental impacts, whether positive or negative, and how it can contribute to reducing the carbon footprint. This study aims to analyze the technologies and environmental issues involved in the production process of obtaining anhydrous ethanol from corn.

Keywords: Ethanol; Corn; Biofuel; Production process; Environmental issues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz energética (a) Mundial em 2020; (b) Brasileira em 2022.....	2
Figura 2. Comparativo Entre as Modalidades de Usinas de Etanol.	6
Figura 3. Calendário Agrícola do Plantio e Colheita do Milho	8
Figura 4. Estrutura Anatômica do Grão de milho	8
Figura 5. Fluxograma de Produção de Etanol de Milho por Via Seca	10
Figura 6. Fluxograma de Produção de Etanol de Milho por Via Úmida.....	12
Figura 7. Estrutura do Moinho Martelo	13
Figura 8. Estrutura da molécula de amido e a ação de diferentes enzimas	15
Figura 9. Estrutura da Amilose, Amilopectina, ligações glicosídicas α -1,4 e α -1,6....	16
Figura 10. Fermentação em Série com Reciclo de Leveduras.....	18
Figura 11. Rota Metabólica da Conversão de Glicose em Etanol	23
Figura 12. Configuração da coluna A e B no processo de destilação de bioetanol...24	
Figura 13. Processo de produção de etanol anidro por destilação azeotrópica	26
Figura 14. Processo de produção de etanol anidro por destilação extrativa	27
Figura 15. Processo de produção de etanol anidro por peneira molecular	28
Figura 16. Separação de óleo da vinhaça fina	30

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	Objetivos	3
2.1.	Objetivo Geral.....	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
3.	REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1.	O Etanol no Brasil.....	4
3.1.1.	O Etanol de milho no Brasil.....	5
3.2.	Milho.....	7
3.3.	O Processo produtivo	9
3.3.1.	Moagem.....	11
3.3.2.	Cozimento e Liquefação	13
3.3.3.	Alfa-amilases	14
3.3.4.	Sacarificação e Fermentação	16
3.3.5.	Gluco-amilases	20
3.3.6.	Microrganismos Fermentadores.....	21
3.3.7.	Destilação e Separação	24
3.3.8.	Coprodutos	30
3.4.	Preocupações ambientais	31
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
5.	REFERÊNCIAS.....	36

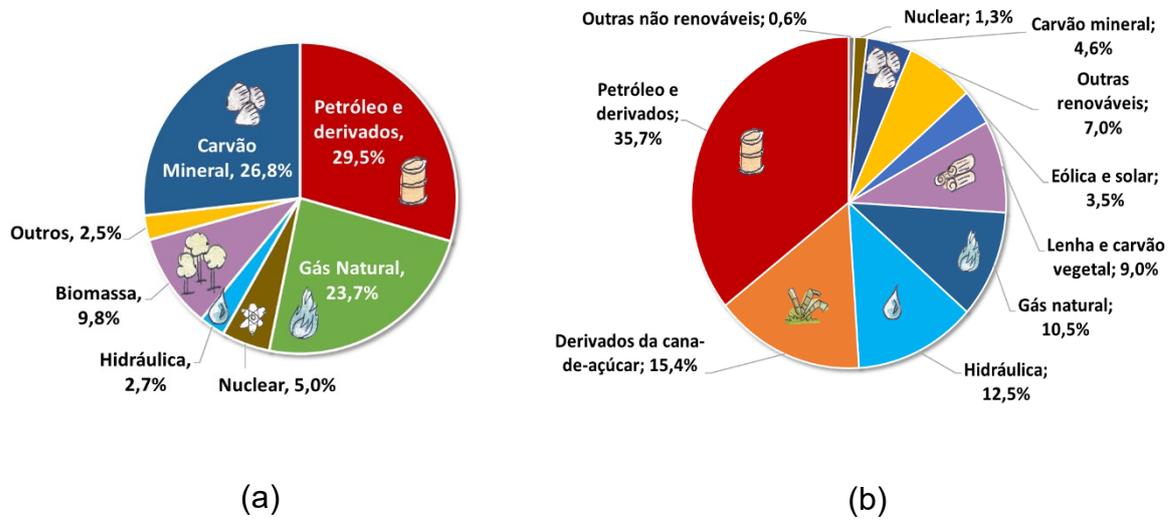
1. INTRODUÇÃO

Os primeiros anos do século XXI foram caracterizados por preocupações de alcance global relacionadas ao abastecimento de energia e à crescente percepção dos impactos das mudanças climáticas iminentes. Essas questões suscitaram um interesse generalizado e conduziram a investimentos substanciais em fontes de energia renovável em nível internacional. No entanto, é importante observar que a matriz energética global ainda é predominantemente composta por fontes de carbono fóssil. O petróleo, como fonte primária de combustível, detém uma fatia significativa, abrangendo 29,5% da matriz energética global (segundo dados de 2020), e seus preços permanecem elevados. Por outro lado, os biocombustíveis líquidos emergem como alternativas diretas que têm o potencial de mitigar as emissões no setor de transporte, reduzir a dependência de importações de petróleo e impulsionar o desenvolvimento rural (CASTAÑEDA-AYARZA; CORTEZ, 2017; EPE, 2022).

O Brasil se sobressai devido à presença de uma matriz energética notavelmente sustentável, na qual aproximadamente 48,4% de sua energia é proveniente de fontes renováveis (valor superior à de 15% no mundo, segundo dados de 2020). Além disso, o país ocupa a terceira posição no ranking global de maiores produtores e consumidores de biocombustíveis, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China. Em contraste com muitos outros países, o Brasil possui a capacidade de expandir a produção de biocombustíveis sem causar um impacto significativo no abastecimento de alimentos. Pesquisas conduzidas pela Associação Brasileira da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica) demonstram que o etanol é produzido com uma eficiência ímpar no Brasil, graças à qualidade da matéria-prima e às condições climáticas altamente favoráveis (SILVA *et al.*, 2021; UNICA, 2022)

A Figura 1 indica as fontes de energia das matrizes energéticas mundial (2020) e brasileira (2022), segundo pesquisa da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Figura 1. Matriz energética (a) Mundial em 2020; (b) Brasileira em 2022.



Fonte: EPE (2022).

Embora o etanol de cana-de-açúcar venha sendo produzido desde o início do século XX, seu verdadeiro sucesso no país começou no século XXI. Durante o século passado, o setor não conseguiu prosperar, pois ainda não se reconheciam plenamente os impactos das emissões de CO₂ resultantes da queima de combustíveis fósseis na qualidade de vida das pessoas. Embora os cientistas já alertassem sobre as consequências do aumento dos gases de efeito estufa na atmosfera, nenhum país havia adotado medidas restritivas significativas. Além disso, o etanol não era economicamente competitivo, o que exigia subsídios para ganhar espaço no mercado doméstico. O sucesso desse setor se deve a avanços tecnológicos, incentivos do Estado para promover o uso de energias renováveis e à introdução de veículos flex-fuel, o que impulsionou a produção de açúcar e álcool. Além disso, em grande parte, isso se deve à redução dos custos de produção (cerca de 70%) e ao constante aumento nos preços do petróleo, tornando esse tipo de combustível altamente competitivo no mercado interno e externo (FREITAS, 2022; LEITE; LEAL, 2007a).

A produção de etanol a partir de milho é uma prática comum em muitos países. Existem várias razões para produzir etanol a partir do milho tais como: a abundância de milho e sua disponibilidade; a infraestrutura existente, incluindo instalações de processamento, redes de distribuição e uma indústria madura; a diversificação de fontes de energia, o que pode reduzir a dependência do petróleo e de combustíveis fósseis e o estímulo à economia rural, uma vez que gera demanda por milho, criando empregos e aumentando a renda para os agricultores locais. No entanto, a produção

de etanol a partir do milho também é objeto de debate devido a preocupações ambientais, como a intensiva demanda de água e o uso de terras agrícolas. Além disso, a competição entre a produção de milho para alimentos e combustíveis também pode ter implicações no preço dos alimentos. Portanto, a produção de etanol a partir do milho é uma questão complexa que envolve considerações ambientais, econômicas e sociais (FREITAS, 2022; G. CASSMAN; LISKA, 2007; USDA, 2022).

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

- Apresentar uma revisão bibliográfica a respeito do processo produtivo de obtenção de etanol anidro a partir do milho.

2.2. Objetivos Específicos

- Apresentar e analisar os estágios da produção de etanol de milho e seus subprodutos;
- Analisar tecnologias emergentes nesse setor industrial;
- Discutir as questões ambientais envolvidas no processo produtivo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O Etanol no Brasil

O desenvolvimento tecnológico de um país está intrinsecamente ligado ao grau de domínio que este possui sobre os recursos energéticos disponíveis, uma vez que esses recursos desempenham um papel fundamental no impulsionamento do progresso tecnológico e no fortalecimento do setor industrial, tendo como resultado direto melhorias no padrão de vida da população (SIMABUKULO *et al.*, 2017). Na década de 1970, a Crise do Petróleo teve um impacto global ao revelar a escassez desse recurso natural, desencadeando uma série de crises econômicas que forçaram muitos países, incluindo o Brasil, a reavaliar suas políticas energéticas. Esse cenário despertou um interesse crescente por fontes alternativas de energia, sendo o álcool, anteriormente considerado um subproduto das indústrias açucareiras, reconhecido como uma solução viável (BERTELLI, 2005; CERQUEIRA; SILVA, 2017).

Naquele período, o setor açucareiro brasileiro, que havia passado recentemente por uma modernização, estava bem preparado para atender à nova demanda por álcool combustível. O Brasil contava com extensas monoculturas de cana-de-açúcar, uma matéria-prima altamente adaptada ao clima local, experiência na fabricação de álcool industrial e uma capacidade ociosa que poderia ser redirecionada para a produção de álcool combustível. Essa estrutura possibilitou maior flexibilidade na exportação de açúcar (BERTELLI, 2005).

Em 1975, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) com o objetivo de reduzir a dependência externa de combustíveis derivados do petróleo, tornar o uso de etanol competitivo através do subsídio de seu preço, promover fontes de energia renovável, desenvolver e interiorizar a tecnologia nacional, além de estimular a geração de emprego e renda (MICHELLON; SANTOS; RODRIGUES, 2008).

Nas décadas seguintes, o Protocolo de Quioto em 1997 oficializou as preocupações globais com o aquecimento global, estabelecendo metas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O uso de biocombustíveis, bio-hidrocarbonetos derivados de fontes vegetais e animais que recebem o prefixo 'bio-' para distingui-los dos produtos derivados do petróleo, emergiu como uma solução abrangente em termos ambientais, econômicos e sociais. Essas mudanças também

fortaleceram a iniciativa do Proálcool e as tecnologias relacionadas ao uso do etanol (LEITE; LEAL, 2007b; MATURANO, 2009; SALLET, 2011).

Atualmente, a produção de etanol tem duas origens: a primeira é a partir de processos fermentativos de culturas ricas em amido (como milho, trigo ou sorgo) ou açúcar (como beterraba ou cana-de-açúcar), conhecido como Etanol de Primeira Geração (EG1). A segunda fonte provém dos resíduos agrícolas dessas culturas, como palha e bagaço, dos quais as componentes lignocelulósicas da biomassa originam o Etanol de Segunda Geração (EG2) (DRABER, 2013; MANOCHIO, 2017). De acordo com a NovaCana, o álcool produzido por esses processos serve a propósitos específicos, dependendo de seu teor de água. Se for hidratado, com até 96% de pureza, é usado como combustível, enquanto o álcool anidro, com 99,6% de graduação alcoólica, é utilizado como aditivo para gasolina para aumentar a octanagem.

No período entre 2012 e 2022, a produção de etanol no Brasil cresceu mais de 21%, com 43 bilhões de litros no último ano, proveniente de estados como São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul que concentram aproximadamente 64% das 236 unidades sucroenergéticas distribuídas pelo país. Apesar de ser o segundo maior produtor de etanol no mundo, o Brasil mantém a sua posição de destaque no mercado externo, sendo responsável por mais de 40% do fluxo da *commodity* do comércio internacional (SOUZA, D. T. de et al, 2023; EPBR, 2023)

3.1.1. O Etanol de milho no Brasil

As razões para a adoção da tecnologia de produção de etanol de milho no Brasil incluem o cenário complexo do setor sucroenergético na década de 2010, com excesso de oferta e baixos preços de açúcar no mercado global, o congelamento dos preços da gasolina que prejudicou a competitividade do etanol. Além dos esforços para diversificar as atividades e melhorar a eficiência industrial, incluindo a produção de EG2 e a recuperação de gás carbônico (CO₂). Assim em 2012, a produção de etanol de milho começou na Usimat em Campos de Julio - MT, tornando-se a primeira usina flex do país e do mundo (NEVES et al., 2021; SILVEIRA, 2013).

A ampla gama de coprodutos é outro fator favorável à utilização de milho como matéria-prima, diversificando as receitas das indústrias. Esses coprodutos incluem

óleo de milho e grãos de destilaria, que podem ser secos (DDG) ou úmidos (WDG), além de conter solúveis (DGGS ou WDGS, respectivamente). Os grãos podem ser facilmente adaptados às necessidades nutricionais do mercado e ao tipo de dieta animal. Enquanto isso, o óleo de milho é direcionado para a alimentação animal e outras aplicações industriais. Na região Centro-Oeste do Brasil, conhecida historicamente por sua alta produção de grãos e pecuária, o etanol de milho ganha cada vez mais destaque. Isso se deve ao fato de que seus coprodutos são altamente atrativos e capazes de atender às demandas regionais de forma eficaz (DA SILVA, 2020).

Existem três modelos principais de usinas de etanol de milho (Figura 2): *Full Milho*, que usa apenas milho como fonte de etanol; *Flex*, usa milho na entressafra ou quando não há cana-de-açúcar disponível; e *Flex Full*, que opera com cana e milho paralelamente. Os modelos *Flex Full* se destacam por integrar processos, reduzindo custos operacionais (OPEX) ao aproveitar a energia excedente do bagaço de cana. No entanto, enfrentam o desafio de adaptar a tecnologia ao contexto brasileiro, visto que os principais fornecedores desses equipamentos, como a ICM Inc. e a Fluid Quip, são internacionais. Empresas brasileiras, como a Fermentec e a Piracicaba Engenharia, estão gradualmente ingressando nesse mercado mundo (NEVES et al., 2021; NIDERA, 2021).

Figura 2. Comparativo Entre as Modalidades de Usinas de Etanol.



Fonte: (NEVES et al., 2021).

A estrutura produtiva do milho e da cana-de-açúcar apresenta uma diferença tecnológica significativa nas etapas anteriores à fermentação. De acordo com Da Silva

(2020), as características dos tipos de carboidratos encontrados na matéria-prima, em especial a conversão do amido em açúcares fermentáveis torna o processo radicalmente diferente do outro.

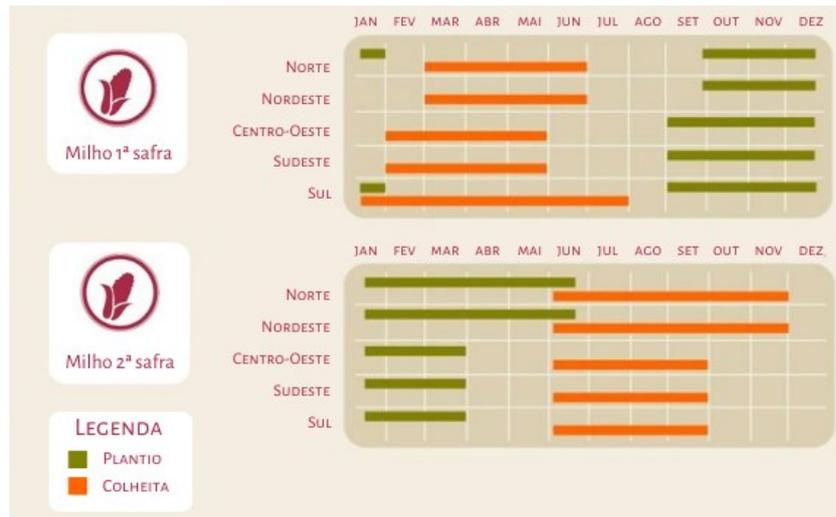
3.2. Milho

O milho desempenha um papel estratégico na produção agrícola nacional, sendo classificado como a segunda cultura mais cultivada no Brasil, estando atrás apenas da soja. Sua produção é destinada principalmente para a fabricação de rações e alimentos para consumo humano (QUEIROZ, 2019). O cultivo do milho ocorre em duas safras (Figura 3): a primeira safra, que representa 40% da produção anual, ocorre de setembro a dezembro e é colhida de fevereiro a junho. Já a segunda safra, que corresponde a 60% da produção, é cultivada de janeiro a março e colhida de maio a setembro (SOUZA et al., 2018).

O Brasil ocupa a terceira posição entre os maiores produtores e exportadores de milho do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e China. No entanto, esse cenário está em processo de mudança devido ao contínuo aumento das exportações brasileiras. Segundo previsões da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a safra 2022/2023 deverá atingir um recorde de produção, com estimados 125 milhões de toneladas de milho. Se essa tendência persistir, o Brasil está no caminho para se tornar o maior exportador mundial de milho em 2023 (Estadão, 2023).

Apesar do notável crescimento na produção e exportação de milho, o uso desse produto na fabricação de etanol permanece concentrado nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Paraná (CONAB, 2023).

Figura 3. Calendário Agrícola do Plantio e Colheita do Milho

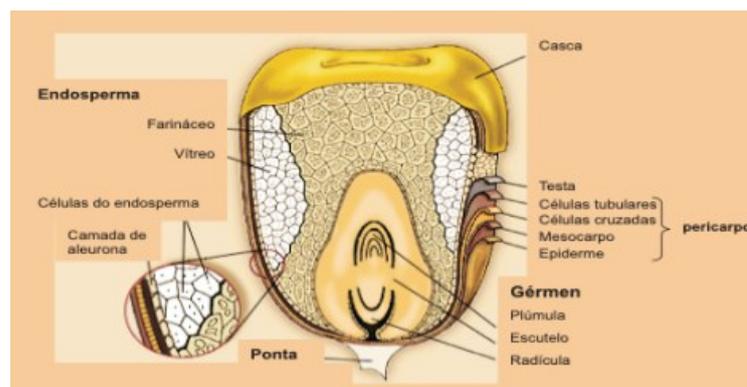


Fonte: Adaptado (CONAB, 2018)

Conforme PAES (2008), os grãos de milho são caracterizados pela sua variação de tons de amarelo e branco, embora algumas variedades possam ser pretas ou vermelhas. Possuem um peso individual médio entre 250 a 300 mg. Esses grãos apresentam quatro estruturas físicas principais: o endosperma, que constitui a porção majoritária do peso do grão seco, carboidratos e proteínas; o gérmen, que concentra a maior parte dos lipídeos e praticamente todas as vitaminas, minerais e açúcares do grão; o pericarpo (casca), que consiste na maior parte das fibras; e a ponta como a Figura 4 ilustra.

Os grãos de milho possuem cerca de 15% de umidade e 85% de base seca, com composição média de seus constituintes variando de 61% a 78% de amido, 6% a 12% de proteínas, 2% a 4% de fibras, 3% a 6% de óleo e 1% a 4% de minerais (PAES, 2008).

Figura 4. Estrutura Anatômica do Grão de milho



Fonte: (PAES, 2006)

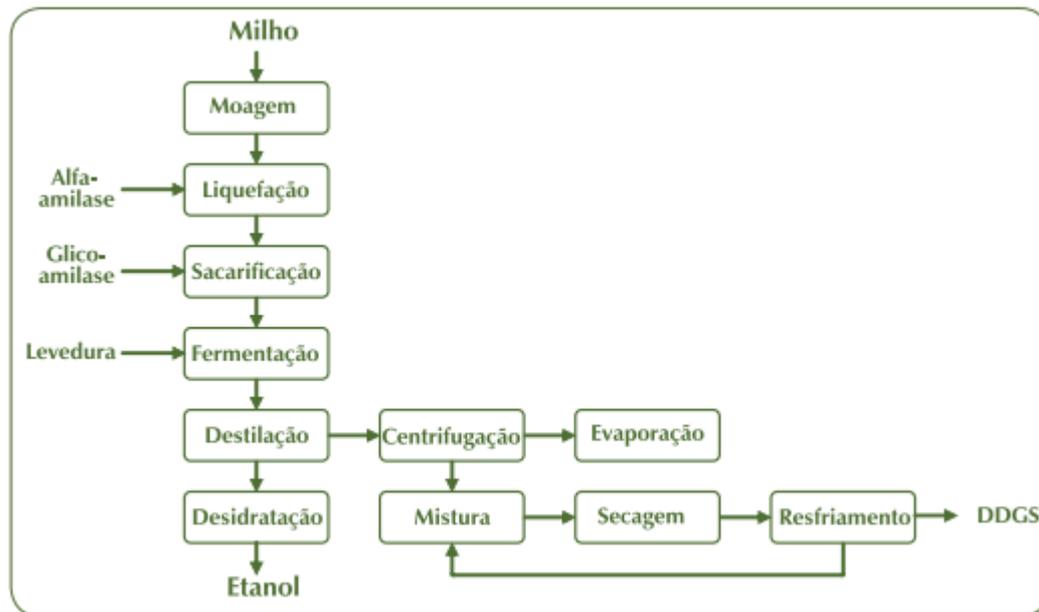
O método mais comum e seguro para o armazenamento de grãos de milho é por meio de silos horizontais ou verticais, que podem ser associados a sistemas de secagem. O processo de secagem pode ser realizado em camadas ou em lotes, enchendo completamente o silo. É essencial realizar a aeração ou transilagem, que envolve a transferência de grãos de um silo para outro, a fim de evitar que a diferença de temperatura entre o ambiente e o interior do milho exceda 5°C (FONSECA, 2021).

Antes do armazenamento dos grãos de milho, é imprescindível realizar a inspeção, pesagem e descarregamento dos caminhões ou vagões de trem no prédio de recebimento. Nesse momento, a limpeza deve ser efetuada para garantir a qualidade e uniformidade da massa de grãos. Caso essa etapa não seja realizada de maneira adequada, pode criar um ambiente propício para a ação de microrganismos, insetos, roedores e pássaros. Além disso, é fundamental assegurar que os grãos estejam secos para minimizar perdas e deteriorações (GRIPPA, 2012).

3.3. O Processo produtivo

A produção de etanol a partir do milho, distingue-se em dois processos, da qual a principal diferença é a abordagem adotada na moagem: úmida ou seca. Até meados dos anos 90, a moagem úmida era mais comum, no entanto, gradualmente, a moagem a seco consolidou-se como o processo mais difundido devido às inúmeras otimizações que reduziram seu custo. Atualmente, mais de 90% da produção norte-americana de etanol de milho é obtida por meio desse método (Figura 5). Além da moagem a seco, outras cinco etapas principais compõem o processo: cozimento, liquefação, sacarificação, fermentação e separação (ALVES et al., 2012; MANOCHIO, 2017).

Figura 5. Fluxograma de Produção de Etanol de Milho por Via Seca



Fonte: (BNDES, 2008)

Uma característica inerente ao processo é a rápida liberação de açúcares no início da hidrólise do milho, seguida de uma diminuição abrupta na velocidade. A hidrólise é uma etapa crítica no processo e pode demandar até 72 horas para ser concluída. Por essa razão, é comum que, para reduzir o tempo de residência do processo, as etapas de sacarificação e fermentação ocorram simultaneamente (PIACENTE, 2016).

No entanto, antes da fermentação é preferível separar o óleo, subproduto deste tipo de indústria, pois garante um produto de maior valor agregado, além de ser uma maneira de controlar a acidez, visto os processos fermentativos tendem a aumentar a acidez do meio (MARCHETTI, 2023). Ademais, não é incomum encontrar o reciclo de uma porção da vinhaça fina produzida aplicado na liquefação/sacarificação, esse processo é conhecido como *backsetting* e visa reduzir o pH e fornecer nutrientes para otimizar a fermentação (BNDES, 2008).

O processo de fermentação ocorre de forma semelhante ao da cana-de-açúcar, usando a levedura *Saccharomyces cerevisiae* para converter glicose em etanol. Em seguida, são separados na destilação os resíduos e o etanol, produzindo o etanol hidratado. Se a intenção do processo for produção de etanol anidro, haverá a etapa adicional de desidratação. Os resíduos são enviados para centrífugas e evaporadores, resultando na formação de vinhaça fina, vinhaça bruta, sólidos insolúveis e xarope,

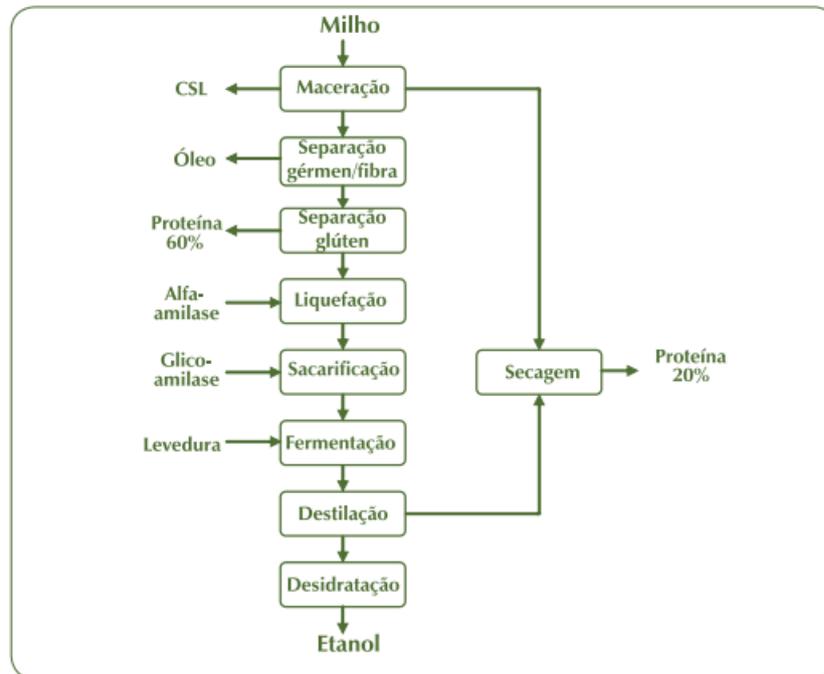
esses dois últimos componentes geram os grãos secos de destilaria (Dry Distillers Grains with Solubles, DDGS) (ALVES et al., 2012; PIACENTE, 2016).

Segundo NEVES et al. (2021), em uma usina de produção de etanol de milho *full*, os gastos são distribuídos da seguinte forma: aproximadamente 68% no milho, 10% na biomassa, 6% em insumos, 4% em mão-de-obra e 1% em outros. Por outro lado, as fontes de receita consistem em 83% de etanol, 13% de DDGS e grãos úmidos de destilaria (Wet Distillers Grains, WDG), 2% de óleo, 1% de energia e 1% de outros. Para a geração de etanol, DDGS, óleo e eletricidade, o processamento de 1.000 toneladas de grãos de milho resulta, respectivamente, em 425 mil litros de etanol, 312 toneladas de DDGS, 12,5 toneladas de óleo e 150 MWh de eletricidade, excedente da queima do cavaco de eucalipto como fonte energética.

3.3.1. Moagem

Como apresentado anteriormente, a moagem pode ser realizada por via úmida ou seca, sendo a moagem seca o modelo mais amplamente adotado atualmente. Na moagem úmida (Figura 6), o milho é submerso em uma solução aquosa com teor de 0,1 a 0,2% de dióxido de enxofre (SO₂), com temperatura de aproximadamente 52°C, por um período máximo de 50 horas. Ao final desse processo, o gérmen, o glúten, a fibra e o amido do milho estarão separados no meio (SCHWIETZKE, 2009). Após a imersão, ocorre a moagem, seguida de processos de separação utilizando centrífugas, peneiras e hidrociclones para obter óleo de milho, glúten de milho, farinha de glúten de milho, frutose e xarope de milho, enquanto o amido é enviado para sacarificação (MANOCHIO, 2017; HOANG, 2021).

Figura 6. Fluxograma de Produção de Etanol de Milho por Via Úmida

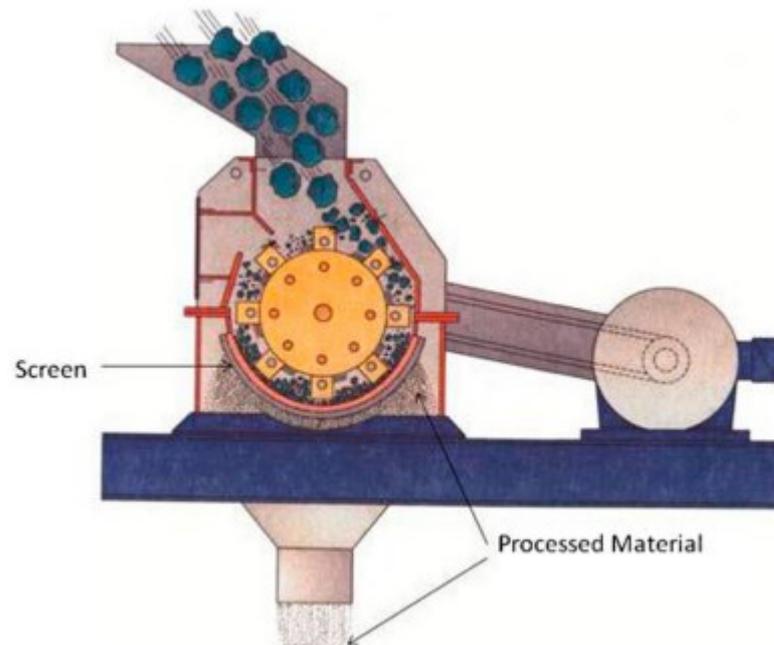


Fonte: (BNDES, 2008)

Na moagem seca, o milho passa por um processo mecânico que quebra a estrutura física da semente até que se torne um pó fino, utilizando moinhos de martelo (SCHWIETZKE, 2009). A estrutura de um moinho martelo (Figura 7) é composta por um rotor com uma série de discos dispostos radialmente, apoiados sobre mancais e rolamentos (CARDOSO et al., 2011).

Durante a alimentação da máquina, os martelos batem repetidamente contra o material, lançando-o contra as telas da estrutura. Esse processo fragmenta o milho em partículas cada vez menores, permitindo que atravessem os furos da tela. Os fragmentos maiores permanecerão na máquina até conseguirem passar pelos furos, os quais podem ser ajustados de acordo com a granulometria desejada (CARDOSO et al., 2011).

Figura 7. Estrutura do Moinho Martelo



Fonte: (EZURIKE et al, 2018)

A granulometria final desejada após a moagem deve ser inferior a 4 mm, uma vez que partículas menores proporcionam uma maior superfície de contato do amido, facilitando assim a hidrólise enzimática (RAMCHANDRAN, 2016). Conforme destacado por GRIPPA (2012), é essencial garantir que as partículas de milho não sejam excessivamente pequenas nem muito grandes, e que sejam o mais uniformes possível, pois isso afeta tanto a produção de etanol quanto a de DDGS.

Por um lado, uma moagem que produz um pó muito fino melhora o desempenho do cozimento e da liquefação, porém dificulta a separação do etanol de seus subprodutos. Por outro lado, uma farinha ligeiramente mais grossa permite uma centrifugação mais eficaz, resultando em uma maior produção de DDGS e na redução dos sólidos suspensos no processo, mesmo que isso implique em uma produção menor de etanol. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio para otimizar o processo (GRIPPA, 2012).

3.3.2. Cozimento e Liquefação

A farinha resultante dos moinhos de martelo é combinada com água quente para formar uma pasta. A hidratação dos grânulos de milho leva à perda de suas

estruturas cristalinas e ao seu inchaço, resultando em um aumento da viscosidade da mistura (HOANG, 2021).

A fonte dessa água pode ser externa ao processo ou reciclada de outras etapas, sendo que a vinhaça fina proveniente da destilação do álcool, conhecida como *backset*, é comumente utilizada e pode compor até 100% da água usada nessa etapa. No entanto, sua utilização é limitada a apenas 40%. Vale destacar que nem todo o material sólido presente se dissolverá na água, resultando em uma suspensão de 20% a 40% de sólidos secos (DS, do inglês Dry-Solids) (DALE e TYNER, 2006).

Além disso, uma porção da alfa-amilase é adicionada ao processo antes que a pasta passe pelo Jet Cooker, que injeta vapor pressurizado a temperaturas acima de 110°C. Essa injeção cozinha a pasta, resultando em sua gelatinização, aumento na velocidade e eficiência da hidrólise do amido, redução da viscosidade e eliminação de microorganismos contaminantes. Essa ação dura de 5 a 8 minutos e direciona a pasta para um tanque de cozimento, onde é mantida aquecida por 30 minutos, seguido da recirculação de parte da pasta, enquanto a outra parte é encaminhada para os tanques de liquefação (GRIPPA, 2012; DALE e TYNER, 2006; RAMCHANDRAN, 2016).

Durante a liquefação, outra dose de alfa-amilase é adicionada, e a mistura permanece sob agitação por um período de 1 a 2 horas, mantendo-se a uma temperatura de 80 a 90°C e um pH entre 5 e 6 para que a enzima termoestável tenha sua ação otimizada. Após essa etapa, a mistura se torna rica em açúcares de cadeias menores, conhecidas como dextrinas, e a viscosidade do meio é reduzida, sendo então chamada de mosto. Por fim, o mosto é encaminhado para a etapa de sacarificação e fermentação, enquanto passa por trocadores de calor para ser resfriado até atingir 30°C (RAMCHANDRAN, 2016; SAMPAIO, 2021).

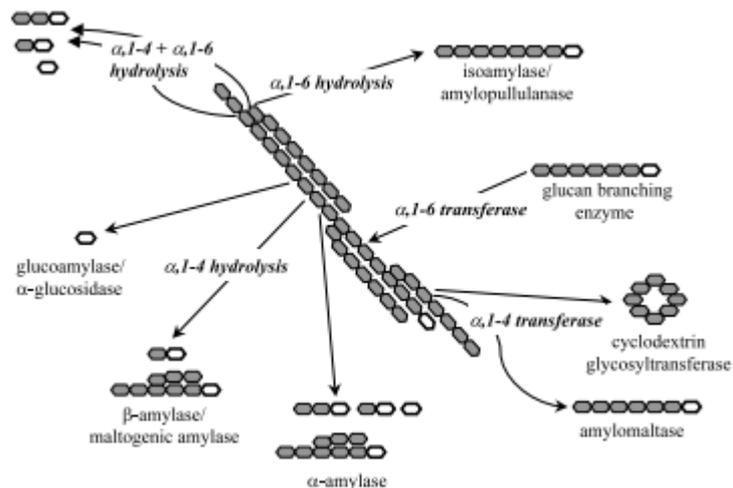
Conforme mencionado anteriormente, é preferível conduzir a separação do óleo antes da fase de fermentação. Nessa abordagem, o processo ocorre durante a hidrólise do amido, em que o mosto resultante da liquefação é submetido a centrífugas purificadoras. Essas centrífugas direcionam o óleo para armazenamento, ao passo que a porção restante retorna à etapa subsequente de liquefação (MARCHETTI, 2023).

3.3.3. Alfa-amilases

As alfa-amilases são um grupo de enzimas que, por meio da hidrólise, realizam a quebra do amido em diferentes tipos de oligossacarídeos (Figura 8) das quais podem ser sintetizadas por várias classes biológicas, como animais, fungos, bactérias e plantas (ROBYT, 2009). Segundo PRAKASH (2010), a grande maioria das enzimas, em faixas de temperaturas superiores a 50-60°C, tendem a desnaturar e perder sua atividade, portanto, enzimas termoestáveis são bastante atrativas, pois garantem melhores condições para processos biotecnológicos em larga escala.

Na indústria de etanol de milho, o amido é submetido ao cozimento e liquefação, processos que podem atingir até 110°C, além disso a produção de açúcares fermentescíveis é determinante para a produção de etanol. Portanto, alfa-amilases secretadas por organismos do gênero *Bacillus* são frequentemente aplicadas, uma vez que não apenas suportam as faixas de temperatura e pH aplicadas, mas também alcançam sua atividade ótima (ZHANG, 2017).

Figura 8. Estrutura da molécula de amido e a ação de diferentes enzimas

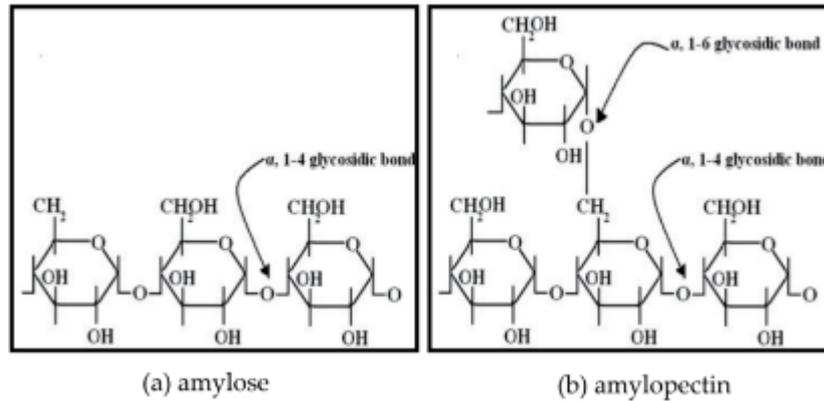


Fonte: (VAN DER MAAREL, M. J. E. C. et al 2002)

O amido é um polissacarídeo que se origina dos polímeros amilose e amilopectina (Figura 9). A amilose é caracterizada por cadeias lineares, enquanto a amilopectina possui cadeias ramificadas, e ambas são compostas pela unidade repetitiva de glicose. As regiões lineares são formadas por ligações glicosídicas α -1,4, enquanto as ramificações ocorrem devido a ligações glicosídicas α -1,6. A alfa-amilase atua nas ligações glicosídicas α -1,4 no interior da molécula de substrato, reduzindo o seu tamanho e de suas ramificações. Ao final da ação da enzima, os produtos finais

incluem oligossacarídeos e monossacarídeos com configuração alfa, como glicose (DP1), maltose (DP2) e, principalmente, dextrinas, que são cadeias de glicose ramificadas com quatro cadeias ou mais de glicoses (DP4+) (ROBYT, 2009; SUNDARRAM, 2014; SAMPAIO, 2021).

Figura 9. Estrutura da Amilose, Amilopectina, ligações glicosídicas α -1,4 e α -1,6



Fonte: (EL-FALLAL et al., 2012)

3.3.4. Sacarificação e Fermentação

Como mencionado anteriormente, as etapas de sacarificação e fermentação ocorrem em conjunto, utilizando uma técnica conhecida como SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation). Nesse processo, o mesmo biorreator destinado à fermentação recebe a enzima gluco-amilase para a quebra das dextrinas em glicose (DP1), maltose (DP2) e maltotriose (DP3). Somente após essa etapa, as leveduras presentes no mosto serão capazes de metabolizar esses açúcares (DALE e TYNER, 2006). Devido à produção gradual de açúcares fermentescíveis, com a presença das leveduras que os consomem imediatamente, o efeito do estresse osmótico causado pela alta concentração de glicose no início da fermentação é reduzido. Além disso, por ser um processo de etapa única, as chances de contaminação biológica são minimizadas (BOTHAST e SCHLICHER, 2005).

Por outro lado, o consumo de glicose pelas leveduras evita o efeito da inibição retroativa na gluco-amilase, permitindo que essa enzima atue por um período prolongado. Adicionalmente, a redução do pH devido à produção de etanol amplifica a atividade enzimática. Além desses benefícios, a SSF apresenta vantagens como a

redução no número de tanques requeridos, resultando em pelo menos 20% de economia nos custos de capital em comparação com o método separado, SHF (Separate Hydrolysis and Fermentation), um tempo de processamento reduzido, maior eficiência e aumento na produção de etanol (BOTHAST e SCHLICHER, 2005; WINGREN et al, 2003; DREYER, 2013).

No entanto, o processo SSF apresenta como principal desvantagem uma taxa de hidrólise mais lenta, associada à faixa de temperatura de operação, enquanto a faixa de trabalho para a fermentação está entre 30 e 37°C, a gluco-amilase tem uma faixa de temperatura ótima de 40 a 60°C. Devido à sensibilidade das leveduras a temperaturas mais elevadas, a enzima não consegue atingir sua atividade ótima, resultando em uma menor produção de etanol em comparação ao processo SHF, essa perda de produção pode ser compensada pelo aumento da dosagem de enzima (VIKTOR, 2013; MYBURGH et al., 2019; ISHIZAKI e HASUMI, 2014)



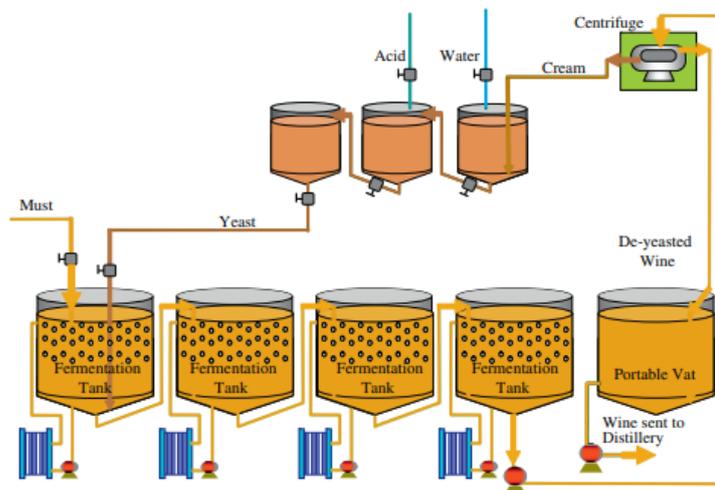
Para cada 1 g de glicose fermentada, espera-se um rendimento teórico máximo de 0,511 g de etanol (C₂H₅OH) e 0,489 g de dióxido de carbono (CO₂). No entanto, na produção industrial, é comum atingir no máximo 95% desses rendimentos teóricos. O rendimento máximo da fermentação nunca é realmente alcançado, uma vez que parte da glicose é utilizada para o crescimento e o metabolismo das células de levedura, além de ocorrerem condições que não são ideais. A produção comercial de álcool pode atingir entre 12% e 18% do volume em relação ao volume do mosto, sendo este o limite de tolerância máximo das leveduras durante o processo (DALE e TYNER, 2006; MADHAVAN, 2012).

O processo de fermentação de etanol pode ser realizado em batelada ou de forma contínua, enquanto as etapas anteriores, como moagem, liquefação, sacarificação, e as etapas posteriores, como destilação, centrifugação e produção de co-produtos, ocorrem de forma contínua (MOSIER e ILELEJI, 2020). De acordo com o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM, 2017), o modelo de fermentação contínua apresenta custos menores de implantação, manutenção, automação e operação do processo, sendo potencialmente até 60% mais econômico em comparação à fermentação em batelada. No entanto, o seu rendimento não

supera o modelo em batelada, e os problemas comuns, como infecções e queda de rendimento, têm soluções mais complexas. Dessa forma, os baixos riscos de contaminação, juntamente com a facilidade de limpeza dos biorreatores e maior flexibilidade de operação, tornam o modelo em batelada mais atrativo e amplamente utilizado.

No modelo de fermentação contínua, não há períodos ociosos, a entrada de substrato e a saída do produto fermentado ocorrem de forma ininterrupta, com agitação mecânica, sendo utilizado um reator perfeitamente agitado adaptado para processos fermentativos (CSTF, *Continuous Stirred-Tank Fermenter*). Para esse método, são usados reatores em série, onde o primeiro é alimentado com o mosto e os demais recebem o substrato parcialmente fermentado (DE VASCONCELOS, 2015). Quando se atinge o estado estacionário, a taxa de crescimento celular e as condições ambientais permanecem constantes, permitindo à manter a mesma cultura de microorganismos por períodos de meses (YANG et al., 2019).

Figura 10. Fermentação em Série com Reciclo de Leveduras



Fonte: (DE VASCONCELOS, 2015)

Quando a fermentação por batelada é adotada, torna-se necessário o uso de vários tanques de fermentação, também conhecidos como dornas ou fermentadores, que estarão em diferentes estágios das etapas de enchimento, fermentação e transferência para a dorna volante. O tempo de fermentação em cada dorna é geralmente de 48 horas, após essa etapa, o mosto, agora chamado de vinho, é transferido para a dorna volante. Esta dorna armazena o produto final de cada uma das dornas de fermentação e garante que o processo como um todo seja contínuo e

que a destilaria seja devidamente alimentada (DE VASCONCELOS, 2015; MOSIER e ILELEJI, 2020).

No contexto das usinas sucroalcooleiras brasileiras, é comum empregar o método Melle-Boinot, que envolve o reciclo de células. Nesse processo, a fermentação é conduzida com uma alta concentração de células. Após a conclusão desse estágio, os microorganismos são centrifugados, purificados com tratamento ácido e, por fim, podem ser reativados para um novo ciclo de fermentação ou comercializados (GOIS-FAVONI, 2018). No entanto, na produção de etanol de milho, o reaproveitamento de leveduras não é viável devido às barreiras apresentadas pelos sólidos em suspensão e pela densidade do mosto. Portanto, a utilização de uma nova leva de leveduras é necessária para cada nova fermentação (BELLUCO e ALCARDE, 2008).

Ao contrário das plantas de etanol de cana-de-açúcar, em que o tempo de fermentação varia de 6 a 12 horas, na produção de etanol de milho, esse tempo é consideravelmente maior, chegando a ser de 4 a 9 vezes superior. Isso torna essencial o uso de células jovens para garantir uma eficiência adequada, o que, por sua vez, diminui o interesse pelo reciclo das leveduras usadas. Para obter quantidades significativas de leveduras saudáveis, emprega-se a técnica de propagação, que envolve procedimentos de assepsia, hidratação, nutrição e reprodução celular em um tanque específico (COLLOGRAI, 2019; SAMPAIO, 2021).

A propagação de leveduras ocorre em um tanque projetado para esse fim, onde uma dose de inóculo geralmente corresponde a 10% do volume total a ser fermentado. Antes de ser utilizado, o equipamento é submetido a um processo de higienização para evitar contaminações. Em seguida, ele recebe uma fração do mosto, que é aerada por injetores e dispersores, e é enriquecido com gluco-amilase e ureia (como fonte de nitrogênio), enquanto permanece sob agitação constante e a temperatura do meio são mantidas entre 32 a 34°C. O tempo estimado para esse processo varia de 6 a 10 horas, momento em que o número de células atingirá níveis adequados para a fermentação (BIOQUÍMICA BRASIL, 2019; RAGHAVENDRAN, 2020).

De acordo com Stewart (2017), o rendimento típico desse processo é de aproximadamente 0,54 g de matéria seca de levedura produzida por grama de açúcar consumido. Além disso, é necessário fornecer 740 mg de oxigênio por grama de matéria seca de levedura produzida. Os principais desafios nesse processo estão

relacionados aos fatores de estresse enfrentados pelas leveduras, embora questões sanitárias também sejam uma preocupação, há várias técnicas na literatura que podem ser empregadas para mitigar esses problemas. Os principais fatores de estresse incluem forças de cisalhamento e turbulência, estresse oxidativo, toxicidade de dióxido de carbono e toxicidade de álcool.

No processo de fermentação, as leveduras passam por quatro fases de crescimento distintas. A primeira fase é a fase de latência, na qual os microrganismos se adaptam ao novo ambiente. Em seguida, ocorre a fase exponencial, na qual o crescimento microbiano é exponencial e limitado pelo substrato e seus nutrientes. A terceira fase é a fase estacionária, na qual o número de células presentes se estabiliza devido a limitação do consumo de açúcares e nutrientes do meio. Por fim, a quarta fase é a fase de morte, na qual ocorre uma queda na densidade de células devido à autólise. A propagação de leveduras é um processo aplicado nas indústrias de etanol de milho para antecipar a fase de latência, criando condições favoráveis e encurtando a fase exponencial, isso contribui para garantir uma alta eficiência na fermentação (TSE et al., 2021).

Durante a reação de fermentação, há a liberação de calor e dióxido de carbono, a energia liberada é tão intensa pode afetar negativamente o processo, dessa forma para manter a temperatura na faixa ideal é necessário empregar mecanismos de controle. O dióxido de carbono gerado, normalmente arrasta uma pequena fração de etanol que é submetido a um processo de recuperação, em seguida o gás pode ser liberado na atmosfera ou então destinado a indústria de bebidas para carbonatação ou na fabricação de gelo seco (BOTHAST e SCHLICHER, 2005; MARTINS, 2022).

Além disso, aproximadamente 5% dos açúcares consumidos na fermentação podem ser convertidos em subprodutos. Dentre os diversos compostos possíveis, os principais incluem o glicerol, butilenoglicol, álcoois superiores, aldeídos e ácidos orgânicos (BORGES, 2018).

3.3.5. Gluco-amilases

As gluco-amilases, ao contrário das alfa-amilases, são capazes de quebrar ligações glicosídicas α -1,4 e α -1,6; por serem exoenzimas, atuam nas regiões externas da cadeia de amido, produzindo glicose ou maltose. As enzimas extraídas

do grupo *Aspergillus* são empregadas em processos industriais e apresentam um pH ótimo de 4,2, suportando temperaturas na faixa de 60 °C. As enzimas alfa-amilase e glucoamilase apresentam ótima sinergia na fabricação de açúcares fermentescíveis, pois complementam as deficiências uma das outras. No entanto, as gluco-amilases não hidrolisam ligações glicosídicas α -1,6 muito bem, sendo necessário o uso de outra enzima, a pullulanase, para suprir essa insuficiência (VAN DER MAAREL, 2002; CRIPWEL et al., 2020).

A gluco-amilase tem como objetivo transformar a solução resultante da liquefação em um xarope com mais de 95% de glicose, sendo capaz de hidrolisar completamente o amido por si só, desde que seja permitido tempo suficiente para sua atuação. No entanto, para que essa etapa seja economicamente viável, é necessário um alto teor de sólidos secos na solução. Outro ponto de atenção em relação à atividade dessa enzima ocorre quando altas concentrações de glicose são atingidas, o que possibilita a reversão dos açúcares, convertendo maltose em isomaltose ou produzindo cadeias de trissacarídeos, ao custo da produção de glicose final. Portanto, é importante garantir o equilíbrio dos parâmetros, como a quantidade de enzima e a temperatura, para evitar esse efeito indesejado (VAN DER MAAREL, 2002; KIM, 2004).

3.3.6. Microrganismos Fermentadores

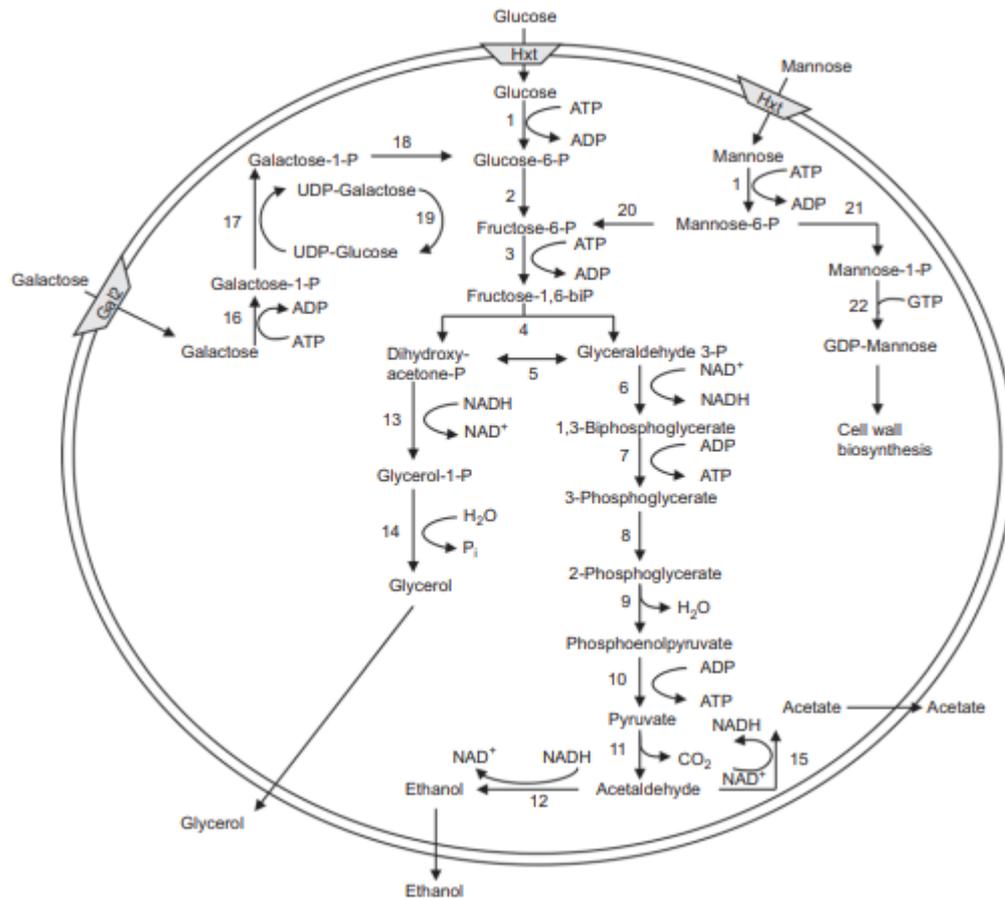
Atualmente, um número restrito de microrganismos fermentadores é responsável pela produção de etanol e outros álcoois com aplicações industriais. Dentre esses microrganismos, as leveduras, como *Aspergillus oryzae*, *Endomyces lactis*, *Kloeckera sp.*, *Kluyveromyces fragilis*, *Mucor sp.*, *Neurospora crassa*, *Rhizopus sp.*, *Torula sp.*, *Trichosporium cutaneum*, bem como membros do gênero *Saccharomyces*, desempenham um papel de destaque nesse setor. Além disso, algumas espécies de bactérias, como *Clostridium acetobutylicum*, *Klebsiella pneumoniae*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Sarcina ventriculi* e *Zymomonas mobilis*, também possuem aplicações importantes (BINOD, 2013). Entre todas essas espécies, a *Saccharomyces cerevisiae* é a mais utilizada e estudada devido à sua robustez em ambientes industriais, apresentando uma ampla variedade de cepas para diversas aplicações (YANG et al, 2007).

Para ser utilizado na produção de etanol, um organismo deve apresentar algumas características desejáveis, tais como: alta produção de etanol, capacidade de consumir diferentes tipos de açúcares, sobrevivência em altas concentrações de etanol, tolerância a altas temperaturas e baixo pH, ambientes nos quais a *S. cerevisiae* demonstrou estar bem adaptada (YANG et al, 2007). A nutrição das leveduras desempenha um papel crítico na manutenção de sua saúde e na garantia de uma fermentação eficaz. Felizmente, o mosto contém quase todos os nutrientes necessários. No entanto, é importante garantir que as concentrações de vitaminas, nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, zinco, ferro, magnésio e outros minerais estejam adequadas (DE VASCONCELOS, 2015).

O nitrogênio, por sua importância na síntese de proteínas, crescimento, reprodução e aumento da tolerância ao etanol, é bastante consumido pelas leveduras e, portanto, precisa ser suplementado no mosto para tornar as fermentações mais rápidas e eficientes (CERQUEIRA, 2013). As principais fontes de nitrogênio utilizadas são as amoniacais (sais de amônio), as amídicas (ureia) ou amínicas, e a forma de disponibilidade desse nutriente afeta sua absorção, sendo a forma amoniacal a mais favorável (MONTEIRO, 2015). A adição de ácido sulfúrico para manter o pH em torno de 4,5 também serve como uma fonte alternativa de enxofre, ao mesmo tempo que promove a absorção de fósforo, esse ajuste de pH também favorece a absorção de fósforo, já que o íon dihidrogênio fosfato ($H_2PO_4^-$), que é predominante nessa faixa de pH, é a forma preferida de fósforo pelas leveduras (DE VASCONCELOS, 2015).

A produção de álcool pela *S. Cerevisiae* ocorre pela rota metabólica glicolítica de Embden-Meyerhof-Parnas (EMP), conforme apresentado na Figura 11, nela uma série de reações oxidativas catalisa a quebra da glicose em etanol e gás carbônico. Esse processo ocorre em condições anaeróbicas, através de doze reações, sendo iniciado pela fosforilação da glicose, posteriormente convertida em duas moléculas de piruvato que serão descarboxiladas, reduzidas em acetaldeído e, por fim, produzindo etanol (SAMPAIO, 2021).

Figura 11. Rota Metabólica da Conversão de Glicose em Etanol



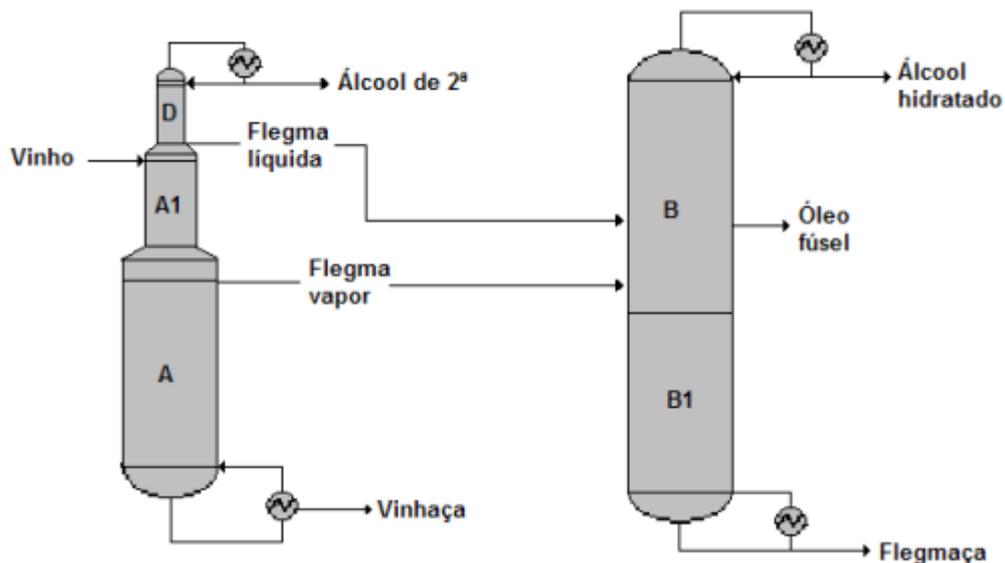
Fonte: (MADHAVAN, A. et al, 2012)

Nas plantas de produção de etanol, a *S. cerevisiae* muitas vezes tem que competir com microrganismos contaminantes, principalmente bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, com destaque para aquelas do gênero *Bacillus*. A contaminação por esses microrganismos pode resultar em uma significativa redução na produção de etanol, afetando negativamente o processo de destilação e representando perdas financeiras que chegam a milhões de reais por ano. O uso de antibióticos é uma prática comum para combater essas contaminações, mas deve ser realizado com cautela, para evitar residual na vinhaça e coprodutos de milho, pois impacta lavouras, lençóis freáticos e animais, além do risco de criar superbactérias. Como alternativa, o uso de antimicrobianos naturais tem ganhado importância, sendo os extratos vegetais a opção prevalente. (FERMENTEC NEWS, 2021).

3.3.7. Destilação e Separação

O vinho resultante da fermentação é direcionado da dorna volante para colunas de destilação, onde ocorre a separação do etanol da mistura. Nas destilarias brasileiras, essa etapa geralmente envolve duas colunas de destilação (Figura 12); na primeira coluna, denominada Coluna A, o álcool é concentrado em uma faixa de 60 a 80% em volume. O produto de fundo dessa coluna é rico em água, fibras, óleos, proteínas e açúcares não fermentados do milho, conhecido como vinhaça bruta, que permanece no processo. O produto de topo da Coluna A, flegma, passa por uma segunda coluna, chamada de Coluna B, para a concentração do etanol até o ponto de azeotropismo da mistura água-etanol, atingindo 95,6% de peso de etanol. O produto obtido na saída de topo é o etanol hidratado. Se for desejada a produção de etanol anidro, são necessárias etapas adicionais para quebrar a concentração azeotrópica, enquanto o produto de fundo da Coluna B é chamado de flegmaça (REIS et al, 2017; BOTHAST e SCHLICHER, 2005; GENEROSO, 2021).

Figura 12. Configuração da coluna A e B no processo de destilação de bioetanol



Fonte: (JUNQUEIRA, T.L., 2010)

Nas colunas de destilação A e B, é empregado o processo de destilação contínua, fazendo uso de colunas de pratos para realizar a separação com base na diferença de volatilidade dos componentes do vinho. A coluna A, também pode ser

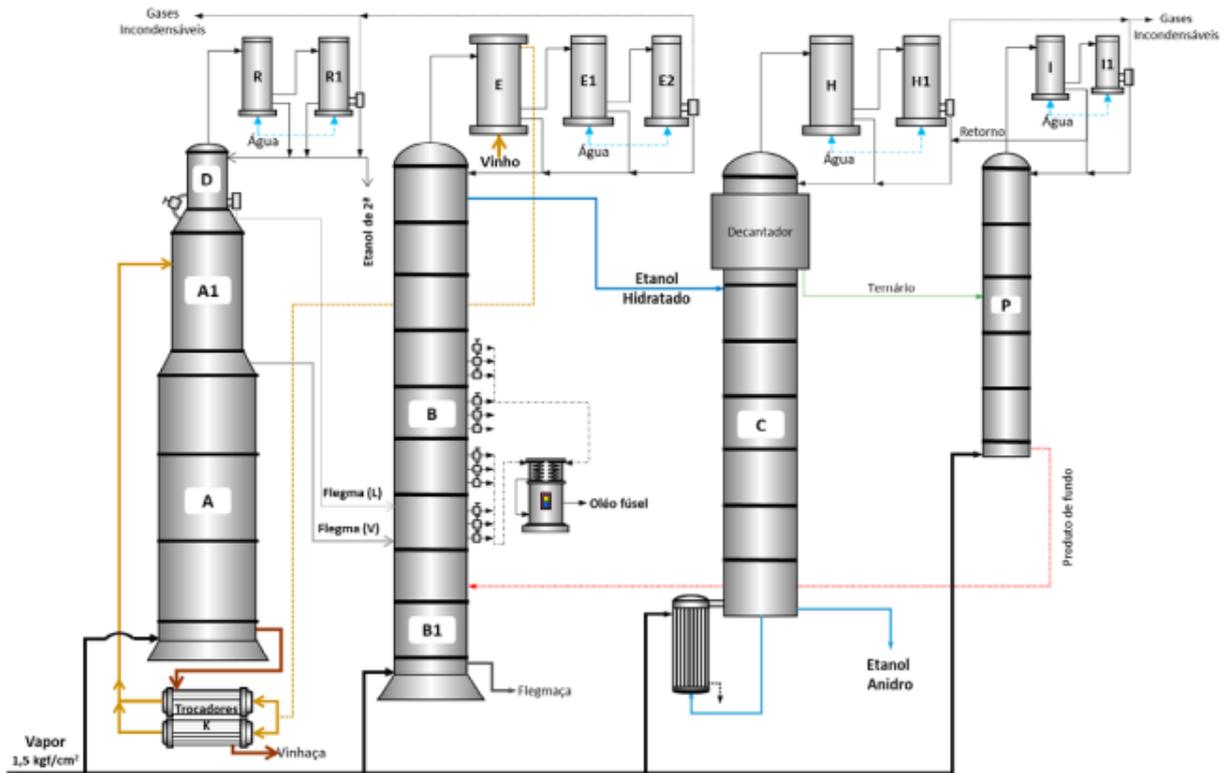
chamada de coluna de esgotamento, sua alimentação é feita no topo da coluna para maximizar saída dos componentes mais voláteis, enquanto que a coluna B chamada de coluna de retificação recebe alimentação nos pratos intermediários para concentração de etanol. Antes de entrar nos equipamentos dessa etapa, a alimentação precisa ser aquecida até 93°C, isso pode ser feito por meio de integrações energéticas para aproveitar o calor proveniente da etapa de liquefação ou da vinhaça que retorna do processo. Caso a troca de temperatura não seja eficiente haverá incrustações, pois o calor é apenas suficiente para o estágio que alimenta (GENEROSO, 2021; DE BLASIO, 2019; OLIVEIRA, 2022).

A destilação convencional não é capaz de quebrar o azeótropo entre etanol e água, tornando necessário o uso de métodos alternativos para desidratar o etanol. Ao longo dos anos, diversos métodos foram desenvolvidos para realizar essa separação, como o uso de membranas de pervaporação, destilação azeotrópica, destilação extrativa, peneiras moleculares e adsorventes. Esses métodos empregam estratégias que visam alterar a volatilidade relativa dos componentes da mistura ou criar uma barreira física que permite a passagem de um componente. No Brasil, os métodos mais comuns incluem a destilação azeotrópica com o uso de ciclo-hexano como solvente, a destilação extrativa utilizando o monoetileno glicol (MEG) e o uso de peneiras moleculares (HUANG et al., 2008; DIAS, 2008; SAINI et al., 2020).

A destilação azeotrópica está presente em cerca de 60% das destilarias brasileiras, empregando a técnica heterogênea com ciclohexano, uma vez que outros componentes convencionais, como benzeno e tolueno, são considerados carcinogênicos (OLIVEIRA, 2022).

Esse método envolve o uso de duas colunas (Figura 13), a coluna azeotrópica, que introduz uma fase orgânica (agente de arreste) ao meio, criando uma mistura ternária que altera o ponto de azeotropismo. No fundo deste equipamento, o etanol é recuperado em sua forma pura, enquanto no topo, a mistura com o agente de arraste passa por uma coluna de recuperação. O produto recuperado parte superior, solvente, dessa coluna é retornado na primeira coluna, e na parte inferior, obtém-se água (SANTOS et al., 2021).

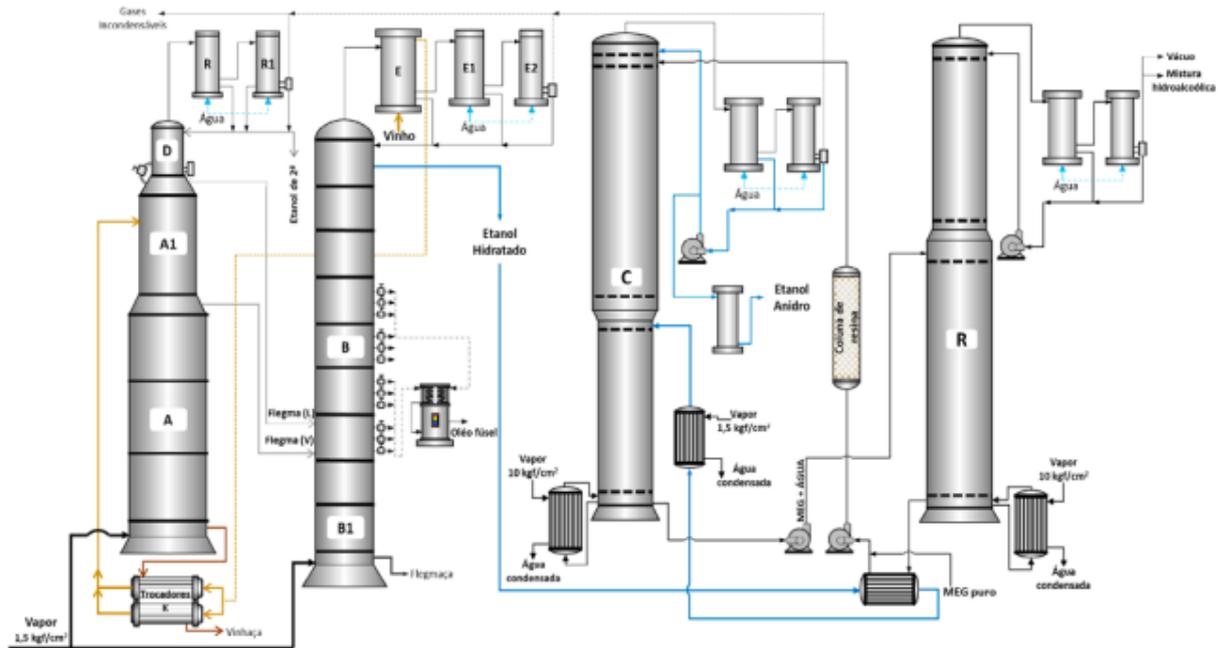
Figura 13. Processo de produção de etanol anidro por destilação azeotrópica



Fonte: (SANTOS et al., 2021)

Na destilação extrativa, ao contrário da destilação azeotrópica, um terceiro componente é adicionado à mistura, mas sem a formação de um azeótropo ternário. Geralmente, um solvente com ponto de ebulição mais alto em comparação com os constituintes da mistura original é utilizado, sendo o monoetileno glicol uma escolha comum devido à sua maior afinidade com a água, formando um sistema homogêneo. O MEG é inserido no topo da coluna extrativa como mostra a Figura 14, produzindo na saída do fundo uma mistura não alcoólica que passa por uma coluna de recuperação para separar o solvente da água, que é reciclado. Na parte superior dessa coluna, obtém-se etanol anidro (ABDALA, 2017; SANTOS et al., 2021)

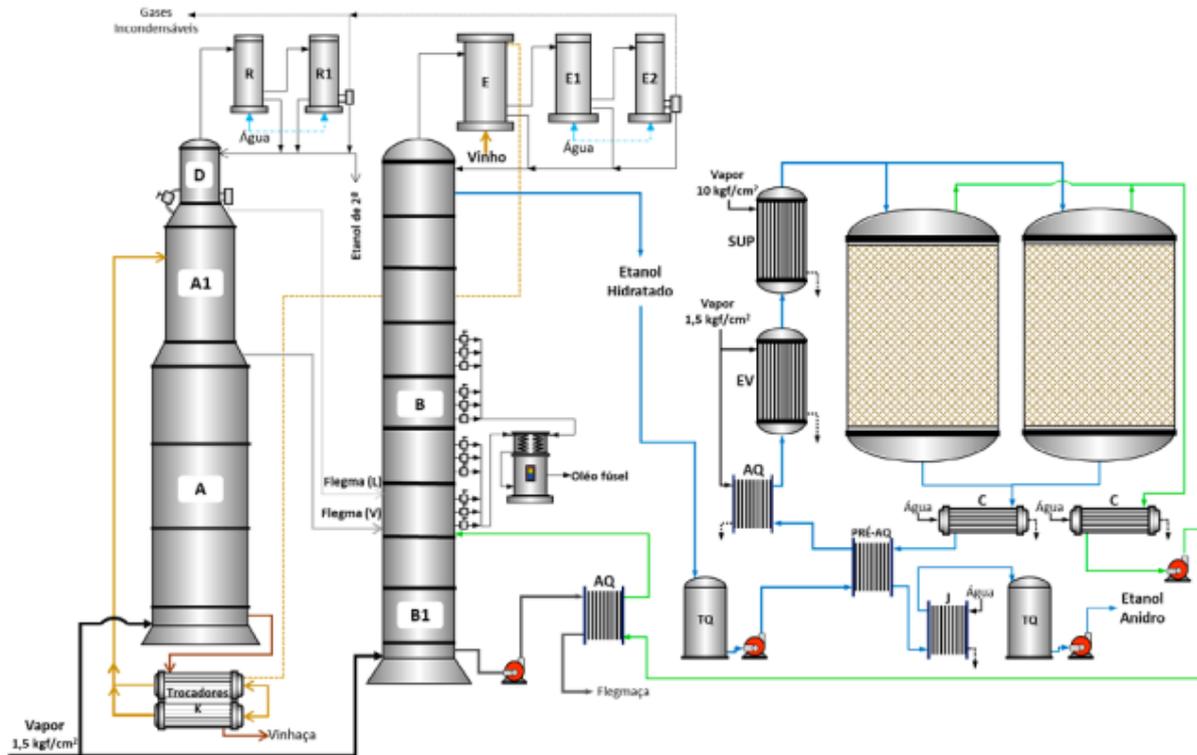
Figura 14. Processo de produção de etanol anidro por destilação extrativa



Fonte: (SANTOS et al., 2021)

Por fim, a peneira molecular funciona por meio da seletividade de adsorção das zeólitas, que são estruturas cristalinas com poros de diâmetro médio de 3 a 4 Ångströms (Å). No fundo do reator, é injetado vapor alcoólico superaquecido, que, em contato com as zeólitas, adsorve as moléculas de água, cujo diâmetro médio é de 2,8 Å, enquanto o etanol desidratado é enviado para ser armazenado. Esse processo ocorre em pressões de 2 a 5 bar até que a peneira atinja a saturação. Nesse momento, é necessário realizar a recuperação por meio da criação de vácuo (pressões inferiores a 0,8 bar) e uso de vapor de etanol anidro para extrair a água, que é direcionada de volta para a coluna de retificação, permitindo que o processo de desidratação continue. Para que o processo não seja interrompido pelos pelo menos dois conjuntos de peneiras moleculares são usadas (Figura 15), sendo um em operação até atingir a saturação e outro regenerando. Essa é a principal tecnologia de produção de etanol anidro usada nos Estados Unidos, enquanto ainda é pouco difundida no Brasil (OLIVEIRA, 2022; NOGUEIRA, 2021; DA SILVA FERREIRA e DELALIBERA FINZER, 2016).

Figura 15. Processo de produção de etanol anidro por peneira molecular



Fonte: (SANTOS et al., 2021)

Dentre os três métodos, a destilação azeotrópica possui o menor custo de implementação devido à sua simplicidade operacional, mas exige um maior consumo de vapor e apresenta riscos de contaminações. A destilação extrativa compartilha dos problemas da destilação azeotrópica, porém com menores quantidades de solvente e menor risco de contaminação. Por outro lado, as peneiras moleculares têm um custo mais elevado para implementação, mas, em compensação, consomem menos utilidades e produzem um etanol sem traços de substâncias potencialmente tóxicas, o que permite seu uso na indústria química fina. Devido a essa relação custo-benefício e à possibilidade de expansão de mercado com um produto de maior pureza, existe uma tendência de que as novas plantas industriais de etanol anidro no Brasil optem pelo uso de peneiras moleculares (SAINI et al., 2020; SANTOS et al., 2021).

O flegma é um vapor de solução hidroalcoólica com cerca de 50 °GL (razão de volume de álcool por volume de solução) que é direcionado para a coluna de retificação com o objetivo de purificação. A flegmaça resultante da coluna B consiste em uma solução aquosa com teor alcoólico inferior a 0,02% em massa. Devido à sua

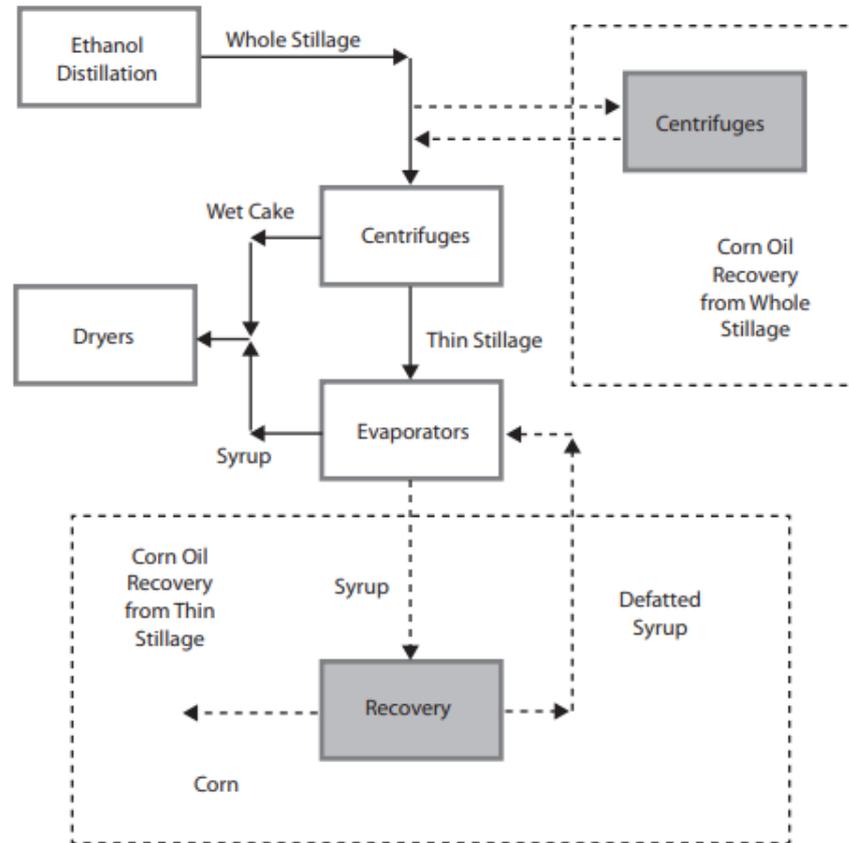
alta pureza, ela é armazenada para uso posterior na limpeza de equipamentos, como as dornas (OLIVEIRA, 2022).

Um problema comum na Coluna B é o acúmulo de uma mistura de alcoóis superiores, conhecida como óleo fúsel, nos pratos, o que resulta na redução da produtividade do processo para evitar esse acúmulo, essa mistura é retirada nos estágios centrais, resfriada e armazenada. Esse subproduto possui uma coloração escura e um odor marcante, e é utilizado na indústria de perfumes como fixador. A quantidade retirada do processo pode chegar a até 0,5 litros por 100 litros de etanol (AZANIA, 2007).

A vinhaça gerada na coluna A é direcionada para centrífugas, onde ocorre a separação entre sólidos suspensos e líquidos. Isso resulta em dois produtos distintos: um bolo úmido, que já pode ser considerado um dos subprodutos desse processo, chamado WDG, e a vinhaça fina. A vinhaça fina, rica em sólidos solúveis, tem parte de si retornando ao tanque de liquefação, enquanto outra passa por evaporadores para ser concentrada em xarope. O WDG, com 65% de umidade, é combinado com o xarope contendo 35% de sólidos e é processado em um secador de tambor rotativo, resultando no DDGS, que possui um teor de umidade de aproximadamente 10% (REIS et al, 2017; BNDES, 2008; KWIATKOWSKI, 2006).

O óleo de milho é obtido durante a produção do xarope, sendo recuperado por meio de outro conjunto de centrífugas para separação do concentrado da vinhaça fina (Figura 16). A concentração do xarope é realizada em evaporadores de múltiplos efeitos, que envolvem o uso de temperaturas elevadas. É fundamental que as condições desse processo sejam cuidadosamente controladas para evitar que a solução escureça excessivamente, o que poderia afetar a qualidade do DDGS (MOREAU et al., 2014).

Figura 16. Separação de óleo da vinhaça fina



Fonte: (MOREAU et al., 2014).

3.3.8. Coprodutos

A introdução de indústrias de etanol de milho no Brasil é relativamente recente, portanto, o mercado para o consumo de seus coprodutos, como o WDG, WDGS, DDG e DDGS, ainda não é tão amplo quanto em países onde esse modelo de indústria já está bem estabelecido. As características nutricionais desses coprodutos têm sido amplamente estudadas para compreender sua utilidade no contexto do agronegócio brasileiro. Tendo aplicações como alimento para gado de corte, gado leiteiro, suínos, aves e peixes (SANTOS, F. R. et al., 2019; MOHAMMADI SHAD et al., 2021).

Os grãos de destilaria de milho possuem um teor proteico que varia de 28% a 36% em relação à matéria seca. Esse alto teor proteico se deve à presença de células de levedura mortas, o que aumenta a quantidade de aminoácidos e nutrientes, além de melhorar o sabor do alimento. Além disso, o elevado teor de fibras, junto ao teor de gordura são a fonte principal de energia, tem efeitos benéficos na digestão dos

ruminantes. No entanto, é importante destacar que as características nutricionais variam significativamente de acordo com a qualidade da matéria-prima utilizada (PECKA-KIEŁB, 2017).

O WDG e WDGS possuem preço mais baixo em comparação com seus equivalentes secos, devido à presença de água, o que os torna mais pesados. Essa opção é mais vantajosa para produtores rurais que estão localizados próximos às usinas, pois o produto tem uma vida útil curta, variando de 3 a 7 dias. Por outro lado, o DDG e o DDGS não possuem essa limitação, pois o processo de secagem estende sua vida útil para 1 ano, permitindo o armazenamento de quantidades maiores e a possibilidade de transporte a longas distâncias. Portanto, seus preços podem ser até três vezes mais elevados do que os preços do WDG e WDGS. Um fator determinante para a qualidade desses produtos é sua composição química, que, como mencionado anteriormente, pode variar consideravelmente devido à matéria-prima, bem como a coloração, que deve apresentar uma tonalidade amarelo-dourado (AGROLINK, 2021; MOHAMMADI SHAD et al., 2021).

O óleo de milho possui diversas aplicações e um valor agregado significativamente maior que os outros produtos da planta de etanol de milho. Além de ser utilizado na fabricação de ração animal, ele também é direcionado para as indústrias de biodiesel, alimentícia, farmacêutica e química. A qualidade e a estabilidade do óleo são fortemente influenciadas pela quantidade de resíduo de água, sendo essencial minimizar essa presença. Além disso, a presença de sedimentos é um fator crucial que deve ser minimizado, e sua ocorrência pode variar sazonalmente e geograficamente, influenciada pelos diferentes climas e regiões (DI LENA, 2020; NOGUEIRA JUNIOR, 2022).

3.4. Preocupações ambientais

Os biocombustíveis, embora sejam considerados alternativas mais sustentáveis aos combustíveis fósseis, ainda suscitam questionamentos, pois competem com fontes alimentícias por recursos e têm impactos no uso da terra. Para investigar esses e outros impactos, é realizada uma análise do ciclo de vida (ACV) que avalia o balanço energético, a redução de emissões, a viabilidade econômica e o

impacto no abastecimento de alimentos. Pesquisas sobre essa temática, que analisam o etanol de milho no contexto brasileiro, existem, embora sejam restritas devido ao setor ainda ser novo. No entanto, com base em experiências de outros países, é possível obter uma perspectiva (NEVES et al., 2021).

As preocupações relacionadas aos impactos ambientais do etanol de milho podem ser atribuídas, em grande parte, à produção agrícola de milho, enquanto a produção, distribuição e uso do biocombustível apresentam impactos menos preocupantes. O cultivo do milho, com o uso de fertilizantes, agrotóxicos e pesticidas, tem impactos significativos na água e no solo, contribuindo para problemas como eutrofização, hipoxia, erosão, perda de carbono orgânico e contaminações (HOEKMAN et al., 2018).

Segundo MOREIRA et al. (2020), na ACV do etanol de milho no modelo de planta full no Mato Grosso, observa-se que o cultivo do cereal e seu transporte correspondem a 78% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), e durante o seu processamento, 60% das emissões provêm do consumo de eucalipto para geração de vapor e eletricidade.

A pegada de carbono do etanol de milho, conforme encontrado na pesquisa de MOREIRA et al. (2020), variou de 18,3 a 25,9 CO₂eq/MJ devido à metodologia na abordagem atribucional, apresentou uma pegada de 4,5 CO₂eq/MJ na abordagem consequential e uma estimativa de mudança de uso da terra induzida (ILUC) de -4,7 gCO₂e/MJ, o que significa uma redução no acúmulo de GEE. Esses dados são muito promissores, especialmente quando comparados com a pegada de carbono da gasolina (87,4 gCO₂e/MJ) e do etanol de milho dos Estados Unidos (48,5 gCO₂e/MJ) (NEVES et al., 2021).

A expansão da produção de etanol de milho gera uma maior demanda por sua matéria-prima e, conseqüentemente, maiores áreas de plantio. No entanto, devido ao método de plantio integrado à soja e à competição do DDGS com esses cereais na alimentação do gado, torna-se mais complexa a previsibilidade da expansão do uso da terra. Além disso, há um incentivo maior para o plantio de florestas de eucalipto, que concorrem com as plantações de soja, e contribuem para a captura de carbono, reduzindo assim as emissões de GEE (MOREIRA et al., 2018).

Durante a pesquisa realizada por DONKE et al. (2016), foi conduzido um comparativo do Índice de Retorno sobre o Investimento Energético (EROI) de três

matérias-primas para a produção de etanol em uma planta flex: cana-de-açúcar, milho e sorgo. Os valores encontrados foram de 9,84, 6,05 e 7,21, respectivamente. Vale ressaltar que, mesmo o milho apresentando um resultado inferior, é significativamente superior ao valor norte-americano, que é de 1,62.

O uso de fertilizantes para a suplementação de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, nem sempre é totalmente absorvido pelo cultivo de milho, resultando em impactos nos recursos hídricos. Apesar disso, o milho contém quantidades consideráveis desses nutrientes (3,20% de nitrogênio e 0,29% de fósforo em composição elementar), o que deve ser considerado no processo de produção de etanol e nas fontes de emissão (GERRIOR, 2020). Coprodutos como DDGS possuem quantidades excessivas de fósforo, ultrapassando em até 4 vezes as exigências alimentares do gado, que necessita de 0,25% em sua dieta, esse excedente não digerido pelo animal é excretado e contribui para o processo de eutrofização (ERICKSON et al, 2002; YOU et al, 2023).

O balanço de massa para fósforo e nitrogênio é calculado considerando a entrada desses nutrientes com o milho no processo e a emissão nos grãos de destilaria, vinhaça fina, xarope, águas residuais e oxidadores térmicos. No caso do nitrogênio, a ureia também é uma fonte de entrada no processo (GERRIOR, 2020).

Segundo DA SILVA e CASTAÑEDA-AYARZA (2021), a produção de um litro de etanol demanda 200, 1300 e 2600 litros de água para as matérias-primas de cana-de-açúcar, beterraba e milho, respectivamente. Apesar do Brasil ser rico em recursos hídricos, atualmente, há muita discussão sobre a gestão e reuso desses recursos, com uma crescente pressão sobre as indústrias para reduzir seu consumo.

De acordo com MILANEZ et al. (2014), em seu estudo comparativo entre os diversos tipos de usinas de etanol no Brasil, foram obtidos resultados ambientais ligeiramente superiores para as usinas que consomem cana-de-açúcar em comparação às *flex*. Além disso, o estudo argumenta que a adição do milho à produção de etanol traz mais vantagens, devido ao significativo aumento na produção, favorecendo a posição do etanol como substituto da gasolina. Outro ponto destacado em relação as usinas flex é que, apesar de apresentarem maior emissão de GEE do que as usinas de uso exclusivo da cana-de-açúcar, elas demonstraram desempenho ambiental suficiente para serem consideradas biocombustíveis avançados, conforme

estipulado pela legislação dos Estados Unidos. Isso indica que não há necessidade de penalização desse produto, mesmo para consumidores mais exigentes.

É importante ressaltar que, de acordo com uma reportagem recente de ZOCCHIO (2023), o crescimento vertiginoso das indústrias de etanol de milho nos últimos 5 anos tem gerado grandes preocupações devido ao avanço desse tipo de lavoura na Amazônia e no Cerrado, situação semelhante ao que foi observado com a soja. Além disso, há uma crescente preocupação com o surgimento de zoonoses devido à prática da monocultura.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se propôs a explorar a trajetória histórica do Brasil na produção de álcool, desde seus primórdios até a evolução para a produção de etanol a partir do milho, uma nova e significativa matéria-prima. Além disso, foi detalhado o processo produtivo do etanol de milho, desde a moagem até a separação do etanol e co-produtos, oferecendo uma análise técnica dos principais elementos que influenciam esse processo e como se adequaram ao contexto brasileiro em termos tecnológicos, econômicos e ambientais.

Embora não seja o foco central deste trabalho, inevitavelmente foram realizadas comparações com o já consolidado etanol de cana-de-açúcar. No entanto, é crucial ressaltar que a inserção do milho como uma fonte alternativa nesse mercado não se configura como uma tentativa de substituir a cana-de-açúcar como matéria-prima, pelo contrário, representa o amadurecimento de um setor cada vez mais competitivo, buscando inovações, estratégias de expansão de mercado e diversificação do portfólio.

As análises apresentadas sobre questões ambientais reforça não apenas a importância do etanol de milho como uma alternativa viável, mas também a sua capacidade de coexistir de maneira complementar com as práticas já consolidadas na produção de biocombustíveis para o desenvolvimento sustentável do setor. Esta diversificação com a inserção do etanol de milho fortalece o papel do Brasil como líder no mercado de etanol, impulsionado, entre outros, pelo Renovabio, que atua como

medida de incentivo e ampliação da produção de biocombustíveis. Essas perspectivas promissoras vislumbram a possibilidade do Brasil retomar a posição de maior produtor mundial de etanol combustível, uma posição que já ocupou décadas atrás. Este cenário reflete a capacidade de adaptação do país às demandas crescentes por fontes de energia mais limpas e sustentáveis, reafirmando seu compromisso com a busca constante por soluções inovadoras na transição para uma matriz energética mais sustentável.

Apesar da recente implementação do segmento de etanol de milho no país, seus impactos positivos têm sido significativos, embora ainda permaneça restrito à região Centro-Oeste, em locais específicos devido a questões logísticas e de mercado. A escassez de estudos e informações sobre o tema no contexto brasileiro, tornam necessário buscar apoio em outros países, especialmente nos Estados Unidos, onde empresas possuem uma *expertise* avançada nessas tecnologias de mercado. Isso evidencia a necessidade urgente de investigar esse setor sob diversos prismas, abrangendo áreas como engenharia, economia, aspectos sociais, ambientais e agrícolas, para alcançar um entendimento próprio e profundo. Além disso, dominar a tecnologia e adquirir *expertise* sobre o assunto é essencial para garantir a capacidade de adaptação às crescentes demandas do país por combustíveis, alimentação animal e por impactos ambientais cada vez menores.

5. REFERÊNCIAS

ABDALA, Thais Oliveira. Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

AGRO, C. Milho: Brasil pode se tornar maior exportador mundial do grão. Disponível em: <<https://summitagro.estadao.com.br/comercio-externo/milho-brasil-pode-se-tornar-maior-exportador-mundial-do-grao/>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

ALVES, J. O. et al. Síntese de nanomateriais de carbono a partir do resíduo de milho (DDGS). Química Nova, v. 35, n. 8, p. 1534–1537, 2012.

Antimicrobianos naturais: tecnologias seguras e eficazes contra a contaminação em usinas. FERMENTEC NEWS, 2021. Disponível em: <<https://fermentecnews.com.br/2021/02/12/antimicrobianos-naturais-tecnologias-seguras-e-eficazes-contr-a-contaminacao-em-usinas/>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

AZANIA, Andréa Aparecida de Padua Mathias. POTENCIALIDADE HERBICÍDICA DO ÓLEO FÚSEL. 2007. 81p. Dissertação (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Jaboticabal, 2007.

BERTELLI, Luiz Gonzaga. A verdadeira história do Proálcool. O Estado de São Paulo, São Paulo, 16 nov. 2005. Disponível em: <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/313629>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

BELLUCO, A. E. S.; ALCARDE, A. R. Cana e milho: métodos distintos convergem ao etanol. Revista Visão Agrícola, n. 8, p. 50-52, jan./jun. 2008.

BINOD, P.; SINDHU, R.; PANDEY, A. The Alcohol Fermentation Step: The Most Common Ethanologenic Microorganisms Among Yeasts, Bacteria and Filamentous Fungi. Lignocellulose Conversion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 131–149.

BIOQUÍMICA BRASIL. Produção de Etanol a partir de Milho, conceitos e operação. Disponível em: <<https://bioquimicabrasil.com/2019/07/20/producao-de-etanol-a-partir-de-milho-conceitos-e-operacao/>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1 ed. Rio de Janeiro:

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. ISBN 9788587545244

BORGES, José Ronaldo Machado. Obtenção de bioetanol por fermentação a partir do milho. 2018.

BOTHAST, R. J.; SCHLICHER, M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 67, n. 1, p. 19–25, 14 abr. 2005.

CARDOSO, W.S. et al. Indústria do milho. In: BÓREM, A.; RIOS, S. A. (Ed.). *Milho biofortificado*. Visconde do Rio Branco: Suprema, p. 175 – 195, 2011.

CASTAÑEDA-AYARZA, J. A.; CORTEZ, L. A. B. Final and B molasses for fuel ethanol production and some market implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 1059–1065, abr. 2017.

CERQUEIRA, J.; SILVA, F. S. IMPACTOS DA CRISE DO PETRÓLEO NA ECONOMIA BRASILEIRA. Disponível em: <<https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/08/impactos-da-crise-do-petroleo-na-economia-brasileira.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

CERQUEIRA, D. P. Fermentação alcoólica de mosto com alta concentração de açúcar. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2013.

CNPEM - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS. Fermentação contínua ou em batelada? 2017. Disponível em: <<https://cnpem.br/fermentacao-continua-ou-em-batelada/>>. Acesso em: 10 de nov. de 2023.

COLLOGRAI, Karen Cristina. Avaliação da contaminação por *Lactobacillus fermentum* em processo fermentativo de bioetanol de segunda geração. 2019. Tese de Doutorado. [sn].

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, v. 6, Safra 2018/19, n.2. Segundo levantamento, novembro 2018

CONAB. Safra brasileira de cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. 2023. Acesso em: 10 de nov. de 2023.

CORREIA SANTOS, M. et al. Main Technologies for the Production of Anhydrous Ethanol in Brazil. *Revista Virtual de Química*, v. 13, n. 6, p. 1228–1240, 2021.

CRIPWELL, R. A. et al. Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: Achievements and challenges. *Biotechnology Advances*, v. 42, p. 107579, set. 2020.

DALE, R. T.; TYNER, W. E. Economic and technical analysis of ethanol dry milling: Model description. 2006.

DA SILVA FERREIRA, Franciele; DELALIBERA FINZER, José Roberto. DESEMPENHO DE PENEIRA MOLECULAR NA DESIDRATAÇÃO DE ÁLCOOL ETÍLICO. Em: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Campinas: Galoá. 2016. Disponível em: Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/desempenho-de-peneira-molecular-na-desidracao-de-alcool-etilico?lang=pt-br>>.. Acessado em: 26 nov. 2023

DA SILVA, Haroldo José Torres et al. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v. 29, n. 4, p. 142, 2020.

DE BLASIO, C. *Fundamentals of Biofuels Engineering and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2019.

DE SOUZA, A. E. et al. ESTUDO DA PRODUÇÃO DO MILHO NO BRASIL. *South American Development Society Journal*, v. 4, n. 11, p. 182, 24 ago. 2018.

DE VASCONCELOS, J. N. *Ethanol Fermentation. Sugarcane*. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 311–340.

DIAS, M.O.S. Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes de bagaço. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DI LENA, G. et al. Towards a Valorization of Corn Bioethanol Side Streams: Chemical Characterization of Post Fermentation Corn Oil and Thin Stillage. *Molecules*, v. 25, n. 15, p. 3549, 3 ago. 2020.

DONKE, A. et al. Environmental and Energy Performance of Ethanol Production from the Integration of Sugarcane, Corn, and Grain Sorghum in a Multipurpose Plant. *Resources*, v. 6, n. 1, p. 1, 27 dez. 2016.

DOS SANTOS ZANARDI, Mayara; DA COSTA JUNIOR, Esly Ferreira. Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil. *Revista Liberato*, v. 17, n. 27, p. 19-34, 2016.

DRABER, Katia Maria Mandu. Etanol de segunda geração já é realidade. 2013. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Bioquímica, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena, 2013.

DREYER, Casper Becker. Optimisation of a simultaneous saccharification and fermentation process for use with steam pretreated sweet sorghum bagasse. 2013. Tese de Doutorado. Stellenbosch: Stellenbosch University.

EL-FALLAL, Amira et al. Starch and microbial α -amylases: from concepts to biotechnological applications. *Carbohydrates—Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology*, p. 459-488, 2012.

EPE, E. DE P. E. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Oferta total de etanol alcançará 47 bilhões de litros no Brasil em 2032, projeta EPE. EPBR. Publicado em 24/01/2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/oferta-total-de-etanol-alcancara-47-bilhoes-de-litros-no-brasil-em-2032-projeta-epe/>. Acesso em: 26 nov. 2023.

ERICKSON, Galen et al. Effects of manipulating protein and phosphorus nutrition of feedlot cattle on nutrient management and the environment. *Journal of Animal Science*, 80, 2002. DOI: 10.2527/animalsci2002.80E-Suppl_2E106x.

EZURIKE, B. O. et al. Design, construction and performance evaluation of a flat screen hammer mill machine. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, v. 10, n. 6, p. 683–690, 19 set. 2018.

FREITAS, Y. R. DE. O futuro sustentável da matriz energética brasileira: a importância e viabilidade do etanol de segunda geração no período de transição com ênfase no setor de transportes. 2022. 1–128 f. Trabalho de Conclusão de Curso – UFSCar, São Carlos, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16771/TCC%20-%20vers%c3%a3o%20final%20-%20Freitas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FONSECA, M. J. O. Secagem e Armazenamento. Embrapa Agroindústria de Alimentos. Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/secagem-e-armazenamento>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

G. CASSMAN, K.; LISKA, A. J. Food and fuel for all: realistic or foolish? *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 1, n. 1, p. 18–23, 27 set. 2007.

GENEROSO, B. R. Simulação de uma coluna de destilação para produção de etanol hidratado e análise de perdas na vinhaça e pureza do etanol produzido. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14990>.

GERRIOR, D. et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis of a novel closed loop corn ethanol biorefinery. *Sustainable Production and Consumption*, v. 30, p. 359–376, mar. 2022.

GÓES-FAVONI, S. P. DE et al. Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, n. 4, p. 285–296, 23 maio 2018.

GRIPPA, M. J. C. Planta Flex no Mato Grosso. 2012. 63 p. Monografia (MBA - Gestão do Agronegócio) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

HOANG, T.-D.; NGHIEM, N. Recent Developments and Current Status of Commercial Production of Fuel Ethanol. *Fermentation*, v. 7, n. 4, p. 314, 15 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2311-5637/7/4/314>>.

HOEKMAN, S. K.; BROCH, A.; LIU, X. (VIVIAN). Environmental implications of higher ethanol production and use in the U.S.: A literature review. Part I – Impacts on water, soil, and air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 3140–3158, jan. 2018.

HUANG, H.-J. et al. A review of separation technologies in current and future biorefineries. *Separation and Purification Technology*, v. 62, n. 1, p. 1–21, ago. 2008.

ISHIZAKI, H.; HASUMI, K. Ethanol Production from Biomass. *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. [S.l.]: Elsevier, 2014. p. 243–258.

JUNQUEIRA, T.L. Simulação de colunas de destilação convencional, extrativa e azeotrópica no processo de produção de bioetanol através da modelagem de não-equilíbrio e da modelagem de estágio de equilíbrio com eficiência, 2010. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010

KIM, M.-S. et al. Properties of a Novel Thermostable Glucoamylase from the Hyperthermophilic Archaeon *Sulfolobus solfataricus* in Relation to Starch Processing. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 70, n. 7, p. 3933–3940, jul. 2004.

KWIATKOWSKI, J. R. et al. Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. *Industrial Crops and Products*, v. 23, n. 3, p. 288–296, maio 2006.

LEITE, R. C. DE C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos - CEBRAP*, n. 78, p. 15–21, jul. 2007a.

LEITE, R. C. DE C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos - CEBRAP*, n. 78, p. 15–21, jul. 2007b.

MADHAVAN, A. et al. Bioconversion of lignocellulose-derived sugars to ethanol by engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 32, n. 1, p. 22–48, 4 mar. 2012.

MANOCHIO, C. et al. Ethanol from biomass: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 743–755, dez. 2017.

MATURANO, A. Biocombustíveis podem substituir petróleo. Disponível em: <<http://www.biotec-ahg.com.br/index.php/pt/acervo-de-materias/biocombustiveis/502-biocombustiveis-podem-substituir-petroleo->>. Acesso em: 23 nov. 2023.

MARCHETTI, L. S. Análise comparativa de uma planta de etanol de milho e de cana-de-açúcar. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

MARTINS, Thayná Terezinha Marques. Processos e análises no monitoramento de uma usina de álcool. 2022. 50 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Química Tecnológica e Industrial) – Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

MICHELLON, E.; SANTOS, A. A. L.; RODRIGUES, J. R. A. BREVE DESCRIÇÃO DO PROÁLCOOL E PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O ETANOL PRODUZIDO NO BRASIL. 2008, Rio Branco-AC: SOBER, 2008. Disponível em: <<https://ageconsearch.umn.edu/record/109225/?ln=en>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

MILANEZ, Artur Yabe et al. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1921>, 2014.

MOHAMMADI SHAD, Z.; VENKITASAMY, C.; WEN, Z. Corn distillers dried grains with solubles: Production, properties, and potential uses. *Cereal Chemistry*, v. 98, n. 5, p. 999–1019, 19 set. 2021.

MONTEIRO, Bruno Miguel dos Santos. Produção de etanol combustível: efeitos da suplementação nitrogenada na fermentação de mosto de caldo de cana com alta concentração de açúcar. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MOSIER, Nathan S.; ILELEJI, Klein E. How fuel ethanol is made from corn. In: *Bioenergy*. Academic Press, 2020. p. 539-544.

MOREAU, R. A. et al. Aqueous Extraction of Corn Oil After Fermentation in the Dry Grind Ethanol Process. *Green Vegetable Oil Processing*. [S.l.]: Elsevier, 2014. p. 53–72.

MOREIRA, M. M. R.; ARANTES, S. M. Análise socioeconômica e ambiental da produção de etanol de milho no centro oeste brasileiro. INPUT, São Paulo, 2018.

MOREIRA, M. M. R. et al. Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 3, p. 209–216, 13 jan. 2020.

MYBURGH, M. W. et al. Application of industrial amylolytic yeast strains for the production of bioethanol from broken rice. *Bioresource Technology*, v. 294, p. 122222, dez. 2019.

NEVES, M. F. et al. Etanol de Milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil. 1ª ed. Ribeirão Preto: UNEM, 2021.

NIDERA. Cadeia do Etanol de Milho: Os três tipos de usinas de etanol de milho no Brasil". *SomosMilhoes*, 2021. Disponível em: <https://somosmilhoes.com/cadeia-do-etanol-de-milho/#:~:text=Os%20tr%C3%AAs%20tipos%20de%20usinas%20de%20etanol%20de%20milho%20no%20Brasil&text=se%20caracterizam%20em%20fun%C3%A7%C3%A3o%20de,flex%20e%20usina%20flex%20full>. Acesso em: 26 nov. 2023.

NOGUEIRA JUNIOR, E. C. Setor de etanol de milho no Brasil: condicionantes e estratégias competitivas. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NOGUEIRA, L. C. Produção de etanol de milho: efeito de híbridos, tempo e temperatura de armazenamento dos grãos. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal, Frutal-MG.

NOVACANA. Anidro ou hidratado: diferenças. Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/anidro-hidratado-diferencas>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

OLIVEIRA, Luiza Stolte Bezerra Lisbôa de. Produção integrada de etanol de cana-de-açúcar e milho em usinas flex: simulação e análises tecno-econômica e ambiental. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. Embrapa Milho e Sorgo, Circular técnica, n. 75, p. 6, 2006.

PAES, M. C. D. Manipulação da composição química do milho: impacto na indústria e na saúde humana., v. 19, n. 01, p. 2015, 2008.

PECKA-KIELB, E. et al. Use of Corn Dried Distillers Grains (DDGS) in Feeding of Ruminants. *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*. [S.l.]: InTech, 2017.

PIACENTE, Fabrício José; SILVA, Vanessa de Cillos; BIAGGI, Dennys Eduardo; "PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DO MILHO: ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA A PARTIR DE BASES DE PATENTES", p. 1211-1225. In: Anais do 1º Encontro da Nacional de Economia Industrial e Inovação [=Blucher Engineering Proceedings, v.3 n.4]. São Paulo: Blucher, 2016. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-1enei-067

PRAKASH, O.; JAISWAL, N. α -Amylase: An Ideal Representative of Thermostable Enzymes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 160, n. 8, p. 2401–2414, 8 abr. 2010.

RAGHAVENDRAN, V. et al. A microbubble-sparged yeast propagation–fermentation process for bioethanol production. *Biotechnology for Biofuels*, v. 13, n. 1, p. 104, 8 dez. 2020.

RAMCHANDRAN, Divya. Effects of corn quality and storage on dry grind ethanol production. 2016. Tese de Doutorado. University of Illinois at Urbana-Champaign.

REIS, C. E. R.; RAJENDRAN, A.; HU, B. New technologies in value addition to the thin stillage from corn-to-ethanol process. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 16, n. 1, p. 175–206, 7 mar. 2017.

ROBYT, J. F. Enzymes and Their Action on Starch. Starch. [S.l.]: Elsevier, 2009. p. 237–292.

SAINI, S.; CHANDEL, A. K.; SHARMA, K. K. Past practices and current trends in the recovery and purification of first generation ethanol: A learning curve for lignocellulosic ethanol. *Journal of Cleaner Production*, v. 268, p. 122357, set. 2020.

SALLET, C. L. Os biocombustíveis no Brasil e a relação entre os mercados agrícolas e de energia. 2011. 1–80 f. Dissertação de mestrado – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2011.

SAMPAIO, A. B. Controle estatístico de contaminantes na fermentação alcoólica em uma usina de etanol de milho. 2021. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT, 2021.

SANTOS, Mágda Correia et al. Principais Tecnologias para Produção de Etanol Anidro no Brasil. *Revista Virtual de Química*, v. 13, p. 1228-1240, 2021.

SANTOS, F. R. et al. Composição nutricional e valores energéticos determinados com frangos de corte de coprodutos do processamento do etanol de milho. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 71, n. 5, p. 1759–1763, out. 2019.

SCHWIETZKE, S. et al. Ethanol Production from Maize. *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, [S.d.]. p. 347–364.

SILVA, A. L. DA; CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. Macro-environment analysis of the corn ethanol fuel development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110387, jan. 2021.

SILVA, S. P. DA et al. A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. *Pensar Acadêmico*, v. 19, n. 2, p. 557, 16 abr. 2021.

SILVEIRA, Glauber. I Fórum Brasileiro de etanol de milho e sorgo. *AgroANALYSIS*, v. 33, n. 12, p. 40-42, 2013.

SIMABUKULO, L. A. N. et al. Energia, Industrialização e Modernidade. *História Social. Eletromemoria*, p. 1–34, 2017. Disponível em: <<https://eletromemoria.fflch.usp.br/content/energia-industrializacao-e-modernidade-historia-social-lucas-antonio-nizuma-simabukulo-luiz>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SOUZA, D. T. de; ROCHA, J. D.; OSHIRO, O. T.; MINGOTI, R. Perspectivas das exportações de etanol no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, ano 32, n. 1, p. 76-89, jan./fev./mar. 2023.

STEWART, G. G. Yeast Culture Collections, Strain Maintenance and Propagation. Brewing and Distilling Yeasts. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 49–54.

SUNDARRAM, A.; MURTHY, T. P. K. α -Amylase Production and Applications: A Review. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, v. 2, n. 4, p. 166–175, 2014. Disponível em: <<http://article.appliedenvironmentalmicrobiology.com/pdf/JAEM-2-4-10.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

TSE, T. J.; WIENS, D. J.; REANEY, M. J. T. Production of Bioethanol—A Review of Factors Affecting Ethanol Yield. *Fermentation*, v. 7, n. 4, p. 268, 18 nov. 2021.

UNICA, U. DA I. DE C.-A. E B. ALIMENTO E ENERGIA SUSTENTÁVEL DO BRASIL PARA O MUNDO. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

USDA. USDA Factsheet: Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Corn-Based Ethanol. Disponível em: <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/Ethanol_Report_Factsheet_Final.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

VAN DER MAAREL, M. J. E. C. et al. Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family. *Journal of Biotechnology*, v. 94, n. 2, p. 137–155, mar. 2002.

VIKTOR, M. J. et al. Raw starch conversion by *Saccharomyces cerevisiae* expressing *Aspergillus tubingensis* amylases. *Biotechnology for Biofuels*, v. 6, n. 1, p. 167, 29 dez. 2013.

Você sabe a diferença entre DDG e WDG? AGROLINK, 2021. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/noticias/voce-sabe-a-diferenca-entre-ddg-e-wdg-_449525.html>. Acesso em: 26/10/2023.

WINGREN, A.; GALBE, M.; ZACCHI, G. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. *Biotechnology Progress*, v. 19, n. 4, p. 1109–1117, 5 set. 2008.

YANG, Ying; SHA, Ma. A beginner's guide to bioprocess modes—batch, fed-batch, and continuous fermentation. **Enfield, CT: Eppendorf Inc**, v. 408, p. 1-16, 2019.

YANG, Shang-Tian; LIU, Xiaoguang; ZHANG, Yali. Metabolic engineering–applications, methods, and challenges. In *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, pages 73–118. Elsevier, 2007.

YOU, J. et al. Phosphorus (P) recovery from corn biorefineries is promising for mitigating environmental impacts and promoting the P circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 198, p. 107194, nov. 2023.

ZHANG, Q.; HAN, Y.; XIAO, H. Microbial α -amylase: A biomolecular overview. *Process Biochemistry*, v. 53, p. 88–101, fev. 2017.

ZOCCHIO, Guilherme. Produção de etanol de milho dispara, mesmo com temor de proteção ambiental frágil. *Repórter Brasil*, 29 de março de 2023. Disponível em: <<https://reporterbrasil.org.br/2023/03/producao-de-etanol-de-milho-dispara-mesmo-com-temor-de-protecao-ambiental-fragil/>>. Acesso em: 26 nov. 2023.