



**NAYARA DE ALMEIDA BELO**

**ETANOL DE MILHO: CENÁRIO BRASILEIRO E MUNDIAL,  
PROCESSO PRODUTIVO E PERSPECTIVAS**

**LAVRAS – MG**

**2023**

**NAYARA DE ALMEIDA BELO**

**ETANOL DE MILHO: CENÁRIO BRASILEIRO E MUNDIAL, PROCESSO  
PRODUTIVO E PERSPECTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia  
Química, para a obtenção do título  
de Bacharel.

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre ter me guiado e ter sido minha proteção e amparo nessa jornada e nos momentos difíceis.

A minha família por sempre me apoiarem, em especial minha mãe e meu pai que sempre me deram carinho e foram meus maiores incentivadores e ao meu irmão que sempre esteve comigo me alegrando.

Ao meu namorado, Saulo, que esteve ao meu lado me ajudando com zelo e paciência, e me deu apoio e carinho durante essa jornada.

Aos colegas de faculdade, que se tornaram amigos, por toda ajuda nos momentos difíceis e por terem tornado essa jornada mais leve.

Aos meus professores, que foram minha maior fonte de inspiração, e por todo conhecimento que passaram a mim, em especial aqueles que me apoiaram.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia, por todo suporte prestado a mim.

Ao meu orientador, professor Luciano, que me apoiou desde meu trabalho de Iniciação Científica, até meu Trabalho de Conclusão de Curso, e que me ensinou tanto, além de me ajudar e incentivar para realização dessas atividades.

## RESUMO

No atual contexto, com o agravamento dos problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural, em relação ao aquecimento global e efeito estufa, nota-se que a necessidade da produção e consumo de combustíveis de origem renovável está cada vez maior. Nesse cenário, uma opção é o uso de etanol, combustível derivado de matérias-primas de origem vegetal, e que seja sustentável. Tal biocombustível pode ser produzido em biorrefinarias que são complexos industriais que tem a capacidade de produzir diversos produtos finais a partir de matérias-primas renováveis, empregados altos níveis tecnológicos através de processos sustentáveis. No Brasil, o principal insumo para a produção desse biocombustível é a cana-de-açúcar, porém, isso não se replica no cenário mundial, em que o milho é a matéria-prima mais usada. Porém devido a alguns fatores, nota-se um crescimento bastante expressivo da produção de etanol de milho no Brasil, cerca de 15% da produção total de etanol se dá a partir do milho. Para sua produção é necessário que sejam realizadas algumas etapas para conversão do amido e posterior conversão em etanol, durante esse processo são gerados alguns coprodutos que representam algumas vantagens, principalmente financeiras, já que alguns deles, como o DDG (*Distilled Dried Grains*) e WDG (*Wet Distilled Grains*) podem ser comercializados para a alimentação animal, a partir da produção de rações, devido ao seu alto nível nutricional. Os processos de produção de etanol de milho e cana apresentam algumas semelhanças como a etapa de fermentação, porém a etapa de hidrólise é adicionada ao processo de etanol de milho. Espera-se que a produção de etanol de milho aumente nos próximos anos no mundo e também no Brasil. Diante disso, o presente trabalho visa apresentar alguns conceitos da produção de etanol de milho, além do seu processo produtivo e também realizar uma análise do cenário brasileiro, mundial e as perspectivas do setor.

Palavras-chave: Biocombustível, Biorrefinaria, Processo produtivo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das etapas de produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica...	13
Figura 2 – Estrutura do grão de milho.....	15
Figura 3 - Projeção da produção global de milho entre as safras de 2020/2021 a 2029/2030 em bilhões de toneladas.....	16
Figura 4 – Fluxograma de uma usina de etanol de milho.....	17
Figura 5 – Processo produtivo do etanol de milho por via úmida.....	19
Figura 6 – Processo produtivo do etanol de milho por via seca.....	19
Figura 7 – Etapas da produção de etanol de milho – hidrólise.....	20
Figura 8 - Componentes do amido.....	21
Figura 9 – Esquema do processo fermentativo de forma contínua para a produção de etanol.....	24
Figura 10 – Esquema do processo fermentativo de forma batelada para a produção de etanol.....	24
Figura 11 – Comparação entre o processo produtivo do etanol produzido a partir de cana-de-açúcar e de milho.....	33
Figura 12 – Comparativo da produção de etanol de cana-de-açúcar e milho.....	34
Figura 13 – Investimento em energia limpa e combustíveis fósseis ao longo dos anos.....	35
Figura 14 – Comparação do consumo de etanol no mundo em 2018 e perspectivas para 2030.....	36
Figura 15 – Dados da produção de etanol de milho dividido por região.....	38
Figura 16 – Produção de milho no Brasil, dividido em produção total, de primeira e segunda safra.....	39
Figura 17 – Produção de etanol de milho no Brasil ao longo dos anos.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem dos constituintes dos grãos separados por estrutura.....	16
Tabela 2 – Receitas e custos dos coprodutos da produção de etanol de milho.....	27
Tabela 3 – Valores da produção de etanol de milho e coprodutos.....	28
Tabela 4 – Dados de produtividade de biomassa e eficiência de conversão para produção de etanol de diferentes matérias-primas.....	31
Tabela 5 – Dados da produção de etanol de milho no mundo em litros.....	37

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>1.1 Objetivos</b> .....	9
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	9
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	9
<b>2 BIORREFINARIA</b> .....	10
<b>2.1 Conceito</b> .....	10
<b>2.2 Classificação das biorrefinarias</b> .....	11
<b>3 BIOCOMBUSTÍVEIS</b> .....	12
<b>3.1 Etanol</b> .....	14
<b>4 MILHO</b> .....	15
<b>5 PROCESSO PRODUTIVO</b> .....	17
<b>5.1 Preparo da matéria-prima</b> .....	17
<b>5.2 Moagem dos grãos</b> .....	18
<b>5.3 Hidrólise</b> .....	20
<b>5.4 Fermentação</b> .....	22
<b>5.5 Destilação</b> .....	25
<b>6 COPRODUTOS</b> .....	27
<b>6.1 Óleo de milho</b> .....	28
<b>6.2 DDG ou DDGS</b> .....	28
<b>6.3 WDG ou WDGS</b> .....	29
<b>7 ETANOL DE MILHO X ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR</b> .....	31
<b>8 CENÁRIO MUNDIAL</b> .....	35
<b>9 CENÁRIO BRASILEIRO</b> .....	38
<b>10 PERSPECTIVAS</b> .....	40
<b>12 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por combustíveis e a preocupação ambiental são questões que estão sempre em pauta atualmente. Os combustíveis fósseis são os principais causadores do efeito estufa e contribuem significativamente para as mudanças climáticas que vem ocorrendo nos últimos anos. Devido a isso, os biocombustíveis surgem como uma opção mais sustentável frente a esses combustíveis (MELO, 2020).

Uma matéria-prima amplamente utilizada na produção de biocombustíveis é o milho destinado para produção de etanol. Durante o processo produtivo são gerados além do produto desejado alguns coprodutos que podem ser aproveitados de maneiras diversas, como o DDG (*Dried Distillers Grains* – Grãos Secos de Destilaria), atualmente utilizado para alimentação de bovinos e outros como o óleo de milho, WDG (*Wet Distillers Grains* – Grãos Úmidos de Destilaria), xarope de milho, fibras, óleo refinado, farinha de glúten de milho e licor de maceração do milho (OLIVEIRA, 2022).

O milho é uma das culturas mais antigas sendo cultivado no mundo inteiro, devido à sua fácil adaptação a diferentes condições climáticas, solos e seu amplo consumo e utilização. Além de seu uso para alimentação de humanos e animais, esse cereal pode ser destinado para a produção de biocombustíveis. Seu principal e majoritário componente é o amido, um polissacarídeo que pode ser convertido em açúcares utilizados na produção de etanol, combustível que vem ganhando grande destaque nas últimas décadas em todo mundo e no Brasil (MATOS, 2021).

O processo produtivo do etanol de milho tem como principal objetivo a conversão do amido em açúcares fermentáveis que serão convertidos posteriormente em etanol, para essa finalidade são empregadas etapas que envolvem o preparo da matéria-prima, moagem dos grãos e hidrólise do amido, fermentação e destilação.

Segundo Bortoletto & Alcarde (2015), o milho é a matéria-prima mais utilizada para a produção de etanol no mundo. Nos Estados Unidos cerca de 43% da sua produção total do grão é destinado para tal fim. Porém, no Brasil, a cana-de-açúcar é dominante na fabricação do combustível. No entanto a demanda de etanol de milho vem aumentando nos últimos anos, devido ao aumento do consumo de biocombustíveis e ao grande volume de milho que é produzido no país, principalmente nos estados do centro oeste onde existem dificuldades para o escoamento do grão para exportação.



A instalação de usinas *flex* no país pode contribuir para esse aumento. Essas usinas são aquelas que tem capacidade de processar a cana ou milho e a produção é realizada na entressafra e também as usinas *flex full*, em que o etanol é produzido a partir das duas matérias-primas ao mesmo tempo. Há também aquelas usinas que processam o etanol a partir de biomassas lignocelulósicas, como a palha de milho, dando origem aos biocombustíveis de segunda geração.

O milho apesar de estar longe de ser a matéria-prima mais utilizada para a produção de etanol, devido à grande predominância do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, cuja matéria-prima é mais vantajosa e apresenta mais benefícios e produtividade, pode ser uma alternativa bastante viável ao país, principalmente durante o período de entressafra da cana e devido também a disponibilidade desse insumo no país, já que o Brasil é um grande produtor de milho, sendo que na safra 2022/2023 espera-se produzir mais de 120 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2023).

No ano de 2022, os derivados da cana-de-açúcar constituíram 15,4% da matriz energética brasileira, tais derivados foram utilizados principalmente para a geração de etanol combustível (EPE, 2023).

Desse modo, a importância do estudo do processo produtivo e do cenário do etanol de milho se dá principalmente a expansão de seu consumo e produção, principalmente no cenário brasileiro, já que a matriz energética do país tem se tornado cada vez mais voltada ao etanol. Para isso se faz necessário conhecer o processo do etanol de milho e buscar novas rotas tecnológicas a fim de garantir uma maior conversão do produto final.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão da literatura acerca da produção de etanol de milho no cenário mundial e brasileiro.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Apresentar o conceito, definição e classificação de uma usina de etanol com base nas pesquisas bibliográficas.
- Apresentar os principais produtos e coprodutos gerados no processamento do etanol de milho, além de sua cadeia produtiva.
- Abordar o cenário mundial e brasileiro da produção de etanol de milho, além das perspectivas futuras.
- Apresentar um comparativo entre o etanol de milho e cana-de-açúcar.

## **2 BIORREFINARIA**

### **2.1 Conceito**

Atualmente o Brasil tem como principal fonte energética o petróleo e seus derivados, que compõe 35,7% da matriz energética do país. As crises do petróleo e a alta do seu preço, são alguns fatores que influenciam o país a reduzir seu uso, já que o país apesar de produzir uma grande quantidade de petróleo ainda importa grande parte de todo petróleo que consome.

As biorrefinarias podem ser definidas como plantas industriais que tem como atividade principal a produção de combustíveis, energia e outros produtos a partir de biomassa de origem renovável, sendo que seu processamento provoca um menor impacto ambiental (ALVIM, 2014). De acordo com Marques (2019) quando assim se conceitua uma biorrefinaria, ela pode ser comparada a uma refinaria de petróleo, já que nessas também são gerados diferentes produtos finais e entre eles os combustíveis. Porém, existe uma grande divergência entre esses, já que nas refinarias de petróleo, a matéria-prima é de origem fóssil, sendo assim não renovável.

As biorrefinarias são instalações com altos níveis de tecnologia empregados, já que envolvem processamentos complexos que podem gerar mais de um produto final a partir de uma única matéria-prima que pode ser totalmente aproveitada durante o processo, cujo característica fundamental é apresentar uma estrutura e composição heterogênea (RUIZ, 2021). Devido a isso, são consideradas de suma importância para os avanços do século XXI, principalmente quando são associados aos biocombustíveis, que são a principal alternativa frente aos combustíveis fósseis, como o petróleo (BASTOS, 2007).

Pode-se também associar as técnicas e atividades sustentáveis que são capazes de processar biomassas e torná-las energia ou produtos com valor agregado e que possa ser comercializado ao conceito de biorrefinaria. Assim, podem ser abordados diferentes tecnologias e também rotas de processamento além das definições que envolvem instalações e plantas industriais. A tecnologia a ser empregada depende do processo que ocorre, seja ele bioquímico, químico, microbiológico ou termoquímico (LONGATI, 2018).

A biomassa, um dos principais insumos das biorrefinarias é um material de origem vegetal, lignocelulósico, cuja composição é composta principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, por isso se trata de uma fonte sustentável. Pode ter sua origem de fontes primárias sendo aquelas que derivam originalmente de um vegetal como milho ou cana-de-açúcar, ou de

fontes secundárias que tem sua origem de resíduos, sejam eles agrícolas ou industriais. (RUIZ, 2021).

## **2.2 Classificação das biorrefinarias**

As biorrefinarias envolvem diferentes matérias-primas, processos e produtos finais, com isso, também podem receber diferentes classificações. Desse modo, não existe uma classificação clara e exata para os diferentes tipos. Alguns autores dão separações quanto ao tipo de produto final sendo divididos em produtos energéticos, como os biocombustíveis ou produtos materiais que envolvem os outros bens que são gerados. Havendo ainda classificações quanto ao tipo de matéria-prima ou rotas de conversão que a biomassa possa ser sujeita. (ALVIM et al., 2014).

Ademais, outros autores dão classificações mais específicas, segundo Kamm e Kamm (2004), são feitas divisões em fases, que variam de grau a depender da quantidade e tipos de matérias-primas e dos produtos finais, sendo três fases com parâmetros divergentes.

As usinas produtoras de etanol de milho podem ser classificadas como biorrefinarias, desde que apresentem potencial para produzir e gerar produtos de maneira sustentável. Diante disso podem ser classificadas em: usinas *flex*, que são indústrias que tem como principal processo a produção de etanol a partir dos insumos cana-de-açúcar e milho, e apresentam a vantagem de poder produzir por um período maior durante o ano. Já as usinas *full* são aquelas que processam unicamente o etanol de milho. E uma terceira classificação são as usinas *flex full*, em que ocorre a produção em paralelo de maneira simultânea, sendo uma delas produzido etanol de milho e a outra de cana, e o processo de destilação ocorre de forma conjunta entre as duas usinas (OLIVEIRA, 2021).

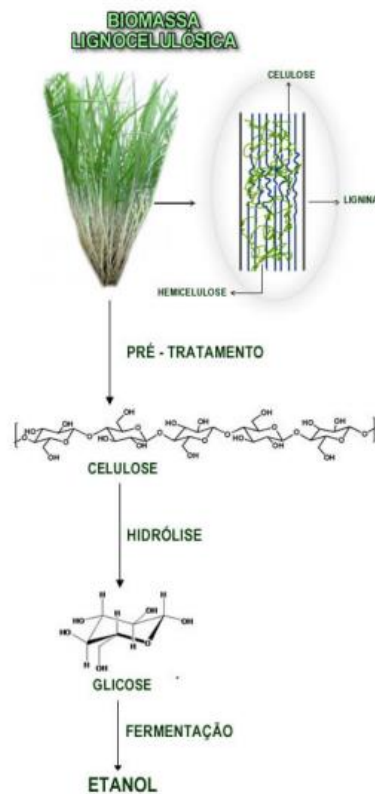
### **3 BIOCOMBUSTÍVEIS**

Os biocombustíveis são combustíveis que tem como matéria-prima alguma fonte renovável e mais sustentável quando comparada aos combustíveis de origem fóssil. São considerados produtos que possuem balanço neutro de carbono, já que quando há a liberação de CO<sub>2</sub> em sua queima, grande parte dele é consumido pelos próprios vegetais durante a fotossíntese (MONTEIRO; MOTA, 2013). Sua matéria-prima é de origem vegetal e atualmente existem estudos para a produção de biocombustíveis de diversos materiais lignocelulósicos.

Existem diversos tipos de biocombustíveis e devido a isso, podem receber diferentes classificações de acordo com a origem de sua matéria-prima, tecnologia empregada e até mesmo com a emissão de gases poluentes. O biometano que é proveniente do biogás, sendo formado por metano e dióxido de carbono, é produzido por meio de bactérias anaeróbias, podendo ser gerado em aterros sanitários e estações de tratamento de água e esgoto e seu principal uso é para geração de energia elétrica em sistemas a gás (MONTEIRO, 2011). Outro exemplo mais comum é o biodiesel, que pode ser produzido de divergentes matérias-primas de origem renovável, sendo este um combustível de suma importância para o setor de transportes. O biodiesel é obtido de óleos vegetais, gorduras ou resíduos de óleo, que passam por um processo de transesterificação ou craqueamento, visando diminuir a viscosidade e produzir um combustível que não gere prejuízos ou danos aos sistemas de motores em que são utilizados, sendo eles motores de combustão interna ou para geração de outras formas de energia, como nas termelétricas (RAMOS et al., 2011).

E um dos biocombustíveis com maior produção e consumo no mundo é o etanol, que vem sendo amplamente utilizado em veículos de transportes como aditivo ou como principal fonte combustível. Seu processo é dividido em algumas etapas, sendo a principal delas a fermentação. As outras etapas envolvem métodos para extração dos açúcares, como a moagem. Posterior a fermentação é realizada a etapa de destilação, que é responsável por purificar e separar o produto final. Etapas de hidrólise e pré-tratamentos também são realizadas quando se trata de bioetanol de 2ª geração, tais etapas envolvem a conversão dos açúcares (MELO, 2020).

Figura 1 – Esquema das etapas de produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica.



Fonte: Santos et al. (2012).

No Brasil, em 2020, 48,4% da energia consumida no país era proveniente de uma matéria-prima de fonte renovável, entre eles o etanol derivado da cana-de-açúcar, a energia hidráulica, eólica e solar. Já a matriz energética mundial conta com apenas 15% de seu total como fontes renováveis. (EPE, 2023).

Na produção de etanol de milho, o principal insumo é o próprio grão, que dará origem ao etanol de 1ª geração, que é aquele oriundo de produtos primários, como o próprio milho e cana de açúcar. Já o etanol de 2ª geração é gerado através de biomassas lignocelulósicas, como os resíduos agrícolas, podendo ser utilizado a palha ou bagaço do milho. No bioetanol produzido a partir do milho, o amido é o polissacarídeo que será a fonte de energia, sendo necessário ser convertido em um açúcar mais simples, tal etapa é chamada de hidrólise, que ocorre na presença de enzimas que são capazes de quebrar esses polissacarídeos. Além dessa etapa é realizada a fermentação e uma etapa de separação dos produtos finais (MUSSATTO et al., 2010). Mesmo se tratando de um processo mais complexo que a produção de etanol a partir

de outras biomassas, como a cana-de-açúcar, muitos países da Europa e América do Norte tem o milho como principal fonte de matéria-prima, e o grande destaque são os Estados Unidos.

### 3.1 Etanol

A necessidade de se produzir um combustível menos poluente e que pudesse substituir o uso dos derivados do petróleo, atrelado ao aumento da demanda e consumo, juntamente com o surgimento dos automóveis *flex*, fez com que o etanol se tornasse um dos combustíveis mais consumidos e produzidos no Brasil e no mundo.

O etanol é um biocombustível gerado através da fermentação de açúcares, a partir de biomassas de origem vegetal, como: cana-de-açúcar, milho, beterraba, sendo elas matérias-primas sacarinas ou amiláceas (MACEDO, 2007).

No Brasil, a produção de etanol teve seu início marcado na década de 1930 com a criação de políticas públicas para incentivo da produção e consumo de etanol, além do início da comercialização de carros *flex* no país, que passaram a ter o etanol como uma opção de combustível. Tal cenário se manteve em alta até a década de 1980, após isso, com a queda do preço do petróleo, ocorreu um declínio da produção, apesar disso, o etanol ainda se mantém como importante fonte energética do país (MATOS, 2021).

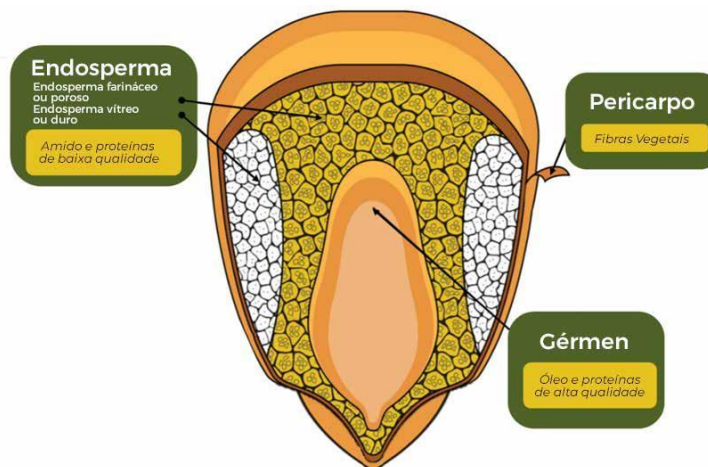
O processamento do etanol passa por três etapas principais, inicialmente a extração dos açúcares, em que podem ocorrer processos físicos como moagem e lavagem que são responsáveis por promover a separação e extração dos açúcares, posterior a isso, é realizada uma etapa de fermentação desses açúcares, em que microrganismos irão promover a conversão dos açúcares em etanol e por fim uma etapa de destilação ou separação, no qual, o álcool produzido deverá ser separado da água e purificado para obtenção de um produto final com teores mais elevados de pureza. Essas etapas compõem o processo do etanol de primeira geração, quando se trata do etanol de segunda geração são realizadas etapas adicionais, sendo realizados pré-tratamentos na matéria-prima, que também é submetida a hidrólise, que será responsável por converter os açúcares mais complexos em açúcares fermentáveis. A hidrólise pode ser realizada por uma via ácida ou enzimática (MELO, 2020).

## 4 MILHO

O milho é uma planta de origem mexicana, sendo cultivado há mais de 8000 anos em diversas localidades do planeta, devido principalmente a fatores como sua fácil adaptabilidade a diferentes tipos de clima e solo. Esses fatores associados as propriedades nutricionais do cereal, fazem com que o milho seja uma das culturas mais produzidas no mundo. Sendo utilizado para alimentação humana e animal. No Brasil cerca de 53% de todo milho cultivado em 2021 foi destinado para produção de ração para alimentação animal e 2% destinados para alimentação humana. Além disso, pode ser utilizado para produção de espessantes, produção de óleos e biocombustíveis (ABIMILHO,2021).

O amido é um carboidrato formado por um polissacarídeo complexo constituído de glicose, é o composto químico que mais está presente em porcentagem nos grãos de milho, cerca de 70% (NOGUEIRA, 2011). O amido quando é submetido a uma etapa de hidrólise é transformado em açúcares fermentáveis, a partir da catálise enzimática, processo que ocorre na produção de etanol e é a etapa antecedente a fermentação (EMBRAPA,2021).

Figura 2 – Estrutura do grão de milho.



Fonte: Centro Internacional de melhoramento de trigo e milho (2019).

São apresentados na Tabela 1 a composição em porcentagem dos constituintes dos grãos de milho de acordo com sua estrutura.



Tabela 1 – Porcentagem dos constituintes dos grãos separados por estrutura.

Componentes do grão	Endosperma (%)	Embrião ou germe (%)	Pericarpa (%)	Pericelo ou ponta (%)	Grão Inteiro (%)
Amido	86,40	8,20	7,30	5,30	71,50
Proteína	9,40	18,80	3,70	9,30	10,30
Óleo	0,80	34,50	1,00	3,80	4,80
Açúcar	0,64	10,80	0,34	1,54	1,97
Cinzas	0,31	10,10	0,84	1,56	1,44
Inteiro	81,90	11,90	5,30	0,80	99,90

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

Atualmente, no cultivo do milho ainda são empregadas técnicas mais rudimentares, em que pequenos produtores utilizam do seu plantio para consumo próprio, mas também, podem ser empregadas formas de cultivo mais tecnológicas, que envolvem desde maquinários sofisticados até variações genéticas na planta. Esse é o caso dos híbridos, que são advindos do cruzamento de espécies diferentes, buscando maior produtividade e qualidade, gerando maior resistência da planta a diferentes e variantes condições climáticas e pragas. Devido a isso, encontra-se uma ampla variedade de espécies de milhos pelo mundo todo.

Na safra 2022/2023, no Brasil foram produzidas cerca de 118,528,1 mil toneladas de grãos, sendo cultivados em 21081,4 mil hectares, com produtividade de aproximadamente 5622 kg/ha. O que representa uma redução superior a 10% em produção quando comparado com safra anterior (CONAB, 2023).

Figura 3 - Projeção da produção global de milho entre as safras de 2020/2021 a 2029/2030 em bilhões de toneladas.

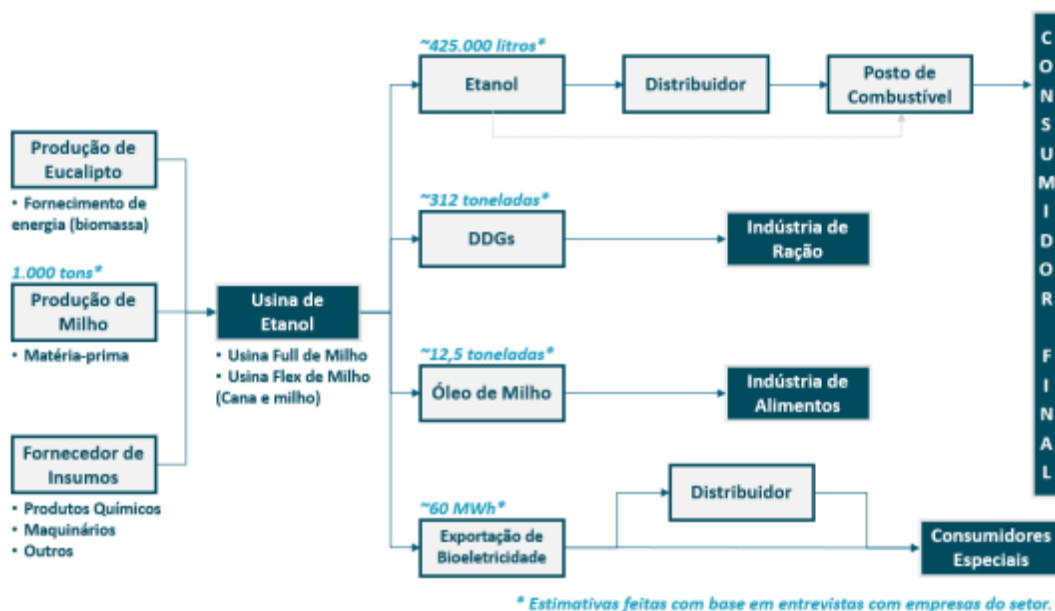


Fonte: Nidera (2021).

## 5 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo do etanol de milho é apresentado na Figura 3, ele pode ser dividido em algumas etapas que envolvem a preparação dos grãos e sua moagem, que pode ocorrer de duas formas, sendo elas por via seca ou via úmida. Após isso, é realizada uma etapa de hidrólise, que também pode ser dividida em três etapas, sendo elas: gelatinização, liquefação e sacarificação (FERNANDES, 2019), essas etapas são realizadas na presença de enzimas que irão promover a conversão do amido em açúcares fermentáveis. Esses açúcares sofrem uma fermentação através da catálise de leveduras que são responsáveis por transformá-las em etanol, que por fim é separado dos outros componentes por meio de um processo de destilação (RIBEIRO, 2023).

Figura 4 – Fluxograma de uma usina de etanol de milho.



Fonte: UNEM (2022).

### 5.1 Preparo da matéria-prima

Após a colheita do milho de forma mecanizada, os grãos são soltos da espiga e são realizados testes a fim de garantir a qualidade do produto final evitando que ocorra a contaminação por microrganismos que podem prejudicar as etapas posteriores.

Após isso, os grãos passam por um processo de limpeza, para eliminar impurezas e possíveis contaminantes, posteriormente são secos para que além de retirar o excesso de água da limpeza, também seja retirada parte de sua umidade, visto que quando é colhido o milho

pode ter até 20% de umidade (FONSECA, 2021). E finalmente os grãos podem ser armazenados em silos nas condições adequadas até que seja iniciada a produção.

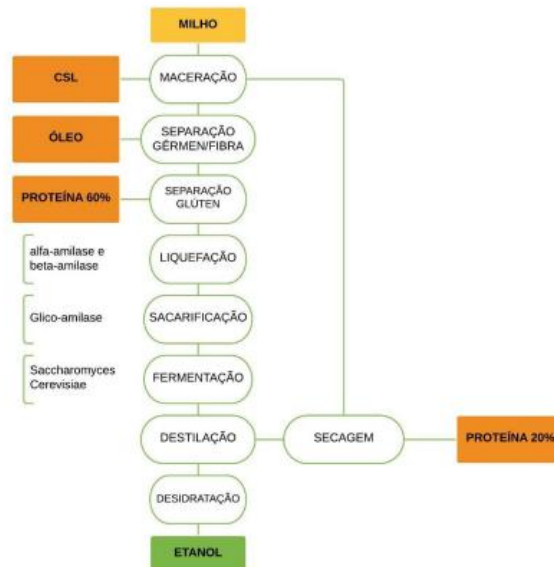
## **5.2 Moagem dos grãos**

A etapa inicial do processo é a moagem na qual os grãos são moídos ou triturados até que ocorra uma redução de seu tamanho, buscando partículas uniformes, formando uma espécie de farinha. Essa etapa tem fundamental importância pois irá garantir uma melhor extração do amido e conseqüentemente maior eficiência de produção, afetando a conversão dos açúcares e rendimento do produto final, pois essa etapa facilita os processos de transferência de calor e massa que ocorrem ao longo dos processos posteriores, principalmente nas etapas de hidrólise e fermentação (RIBEIRO, 2023). Essa etapa pode ocorrer por via seca ou via úmida.

Quando ocorre por via úmida o processo possui etapas que antecedem a moagem. A maceração dos grãos de milho ocorre com a adição de soluções aquosas, geralmente de dióxido de enxofre e ácido láctico que são utilizadas para que ocorram mudanças químicas e físicas na estrutura dos grãos, promovendo um aumento da solubilidade da proteína do milho. Tais soluções aquosas são também responsáveis por hidratar e amaciar a estrutura do grão, com a finalidade de que as etapas posteriores sejam realizadas de forma mais eficazes, em especial que a separação do amido dos demais componentes do grão seja realizada mais facilmente e de forma que sua remoção seja mais eficiente. Essa etapa deve ser realizada em condições específicas, como pH ácido e temperatura controlada em cerca de 52° C (FREITAS et al., 2021).

Ademais, após a maceração, ocorre uma moagem que promove a separação dos germes do milho que posteriormente serão recuperados por meio de uma separação por diferença de densidades. A segunda moagem é onde ocorre a redução do tamanho dos grãos e eles são transformados em pó, também ocorre a separação do amido nessa etapa a fim de garantir que os componentes a serem processados possam ser separados posteriormente, o que facilitaria a geração de coprodutos (MUSSOLINI, 2009). Tais coprodutos são bastante variados quando a moagem ocorre por via úmida, como: amido modificado, goma xantana, dextrinas, óleo refinado, CSL (licor de maceração do milho), ração de glúten de milho, xarope de glucose além da fibra do milho e glúten (PRADO; SILVA; OLIVEIRA, 2016).

Figura 5 – Processo produtivo do etanol de milho por via úmida.



Fonte: Ribeiro (2023).

O processo por via seca, que é esquematizado na Figura 6 é mais simples, pois não ocorre nenhuma etapa anterior a moagem e não é acrescentada nenhuma solução aquosa e o grão todo é sujeito ao processo e subprodutos são separados somente ao final do processo. (D'ARCE; SPOTO; CASTELLUCCI, 2015). Os principais coprodutos gerados por essa via são o óleo de milho, farinha de milho e o DDG, que possui alto valor nutricional.

Figura 6 – Processo produtivo do etanol de milho por via seca.



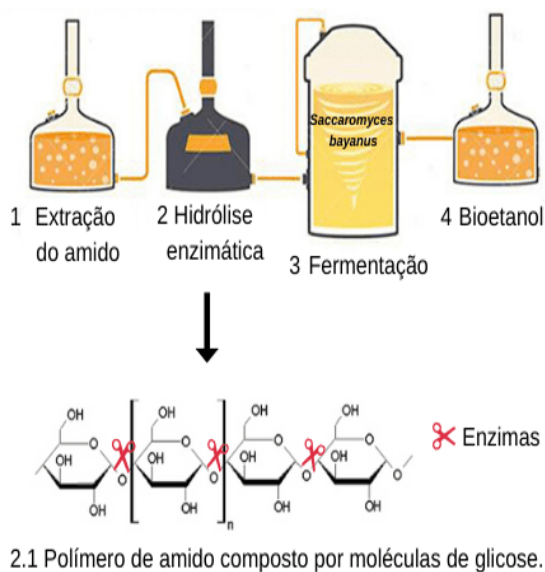
Fonte: Ribeiro (2023).

No cenário atual, verifica-se que é mais favorável a realização da moagem por via seca devido ao seu custo ser menor, apesar da moagem por via úmida levar a um processo final de separação mais simples, que seria a destilação e com maiores rendimentos energéticos. Além disso, nos últimos anos a demanda por DGG, coproduto gerado quando se realiza a moagem por via seca está aumentando, o que acaba gerando mais lucros para as usinas, já que podem comercializar esse produto para com a finalidade de se produzir rações animais (RIBEIRO, 2023). Portanto, o presente trabalho abordará as etapas de produção por via seca.

### 5.3 Hidrólise

Como já citado anteriormente, o amido é o componente que está presente em maior porcentagem no grão de milho. Para a produção de etanol é necessário que esse amido seja convertido em açúcares fermentáveis. Tal processo ocorre a partir da hidrólise, em que são promovidas essas transformações, somente após essa conversão é possível que os microrganismos realizem a fermentação. (SILVA et al., 2022).

Figura 7 – Etapas da produção de etanol de milho – hidrólise.



Fonte: Canal Ciência (2023).

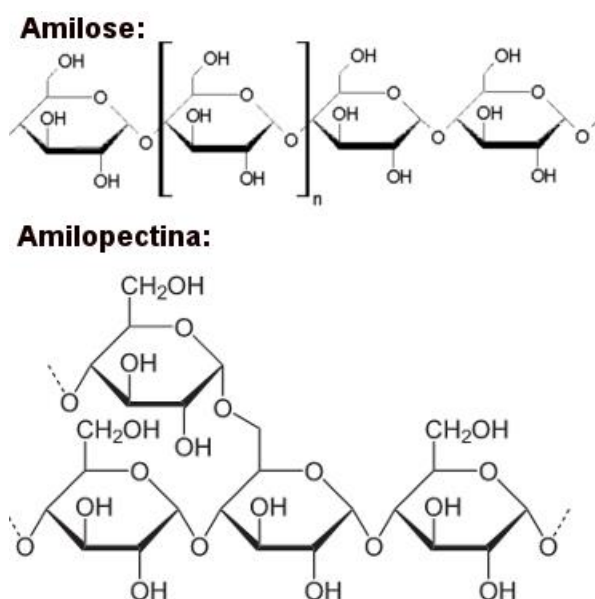
A hidrólise é uma etapa onde ocorrem processos químicos, que envolvem enzimas e condições específicas de temperatura, pressão e pH (VÁSQUEZ, 2007). Para a hidrólise do amido, são utilizadas enzimas como  $\alpha$ -amilases,  $\beta$ -amilases e a glucoamilase, cujas condições de processamento são: pH variando entre valores de 4,5 a 7 e temperatura de 50° a 90°, tais condições devem ser garantidas a fim de evitar que as enzimas sofram desnaturação e que seja

atingido o maior rendimento durante a conversão (FERNANDES, 2019). Visto que essa etapa pode gerar um alto custo para o processo, elas devem ser preservadas a fim de diminuir o capital investido nessa etapa, e conseqüentemente, não aumentar o valor do produto final (RIBEIRO, 2023).

São envolvidas três etapas durante a hidrólise: gelatinização, liquefação e sacarificação (LOPES et al., 2021). A gelatinização tem como finalidade promover a separação dos componentes do amido, essa etapa também pode ser denominada cozimento ou pré-hidrólise, já que acontece anteriormente a adição das enzimas e ocorre a partir da adição de água na farinha de milho, que foi moída na etapa anterior. Essa mistura é aquecida em temperaturas que variam de 62 a 70°C, sendo o milho cozido a vapor, sob alta pressão em um processo contínuo, tais condições são importantes e necessárias para garantir um menor tempo de cozimento e menores temperaturas (SCIPIONI, 2011).

Na gelatinização é formada uma espécie de pasta milho, já que o processo faz com que a viscosidade dos grãos moídos seja aumentada, pois ocorre a adsorção de água pela farinha de milho. Além disso, ao final dessa etapa são adicionados na pasta alguns ácidos para que o pH fique mais baixo e favorável para que as enzimas possam ser adicionadas e realizem a hidrólise do amido (GONÇALVES, 2006).

Figura 8 - Componentes do amido.



Fonte: Mundo da Bioquímica (2023).

A etapa posterior é a liquefação que ocorre em um meio com pH ótimo entre 5,0 e 6,0, na qual as enzimas  $\alpha$ -amilases irão gerar dextrinas e oligossacarídeos a partir da amilose e amilopectina, que são os componentes do amido que foram separados na etapa anterior de gelatinização. Tais moléculas geradas são carboidratos que sofreram uma hidrólise parcial devido ao aquecimento do amido, por meio da ação de enzimas. Essa etapa também promove a redução da viscosidade da mistura, já que nas etapas seguintes, serão realizados processos que envolvem agitação, sendo facilitados dessa forma (MATOS, 2021).

A fase final da hidrólise é a sacarificação que é necessária pois apenas com as etapas de gelatinização e liquefação não é possível que o amido seja totalmente hidrolisado (OLIVEIRA, 2022). Essa etapa consiste na adição de enzimas do tipo glucoamilases, que irão hidrolisar o restante das moléculas, gerando os açúcares fermentáveis, como a glicose, sendo necessário realizar ajustes no pH, que pode variar entre 4,0 e 5,0 (MATOS, 2021), sendo diminuído, já que na etapa anterior, as condições ótimas possuíam valores mais altos de pH.

A sacarificação é feita resfriando-se a pasta de milho, que posterior a isso é denominada massa de milho, esse substrato possui os açúcares que serão fermentados (RIBEIRO, 2023). Essa etapa pode ser realizada separadamente ou de forma simultânea a etapa posterior, já que ela ocorre inicialmente de forma mais rápida, e perde velocidade de reação ao longo do processo (FERNANDES, 2019).

## **5.4 Fermentação**

A fermentação é um processo anaeróbico que ocorre por meio da ação de microorganismos que catalisam um substrato transformando açúcares em álcool e dióxido de carbono, para obtenção de energia na forma de ATP. Sendo as leveduras os microorganismos mais utilizados e aqueles responsáveis por consumir açúcares e transformá-los durante seu metabolismo celular em álcool. A *Saccharomyces cerevisiae* é a levedura mais utilizada em escala industrial no Brasil, atualmente em algumas destilarias são utilizadas leveduras que foram selecionadas ao longo de seus próprios processos produtivos (FAVONI et al., 2018).

As leveduras são microorganismos que podem ser encontradas de forma abundante e diversas na natureza, e suas características principais são: tamanhos e formas variados, unicelulares, heterotróficos, aclorofilados e são seres capazes de realizar processos fermentativos. A levedura utilizada no processo deve ser escolhida de forma a garantir que a fermentação ocorra com maior rendimento, e devem apresentar alta velocidade de fermentação,

elevada conversão de açúcares em etanol, baixa formação de espuma, ser resistente a acidez e altas temperaturas, tolerantes a altas concentrações de substrato e etanol, boa eficiência fermentativa e alta produtividade. Essas características devem ser analisadas a fim de evitar problemas durante o processo fermentativo, como contaminação ou utilização de volumes menos elevados de água e até mesmo leveduras, e também evitar que as leveduras sejam inativadas quando são adicionados componentes com acidez elevada durante a fermentação (VASCONCELOS, 2012).

A fermentação pode ter seus rendimentos e conversão afetados por alguns fatores como: temperatura, pressão osmótica, pH, tipo de nutrientes e oxigenação do meio, concentração de leveduras, contaminação por outros microrganismos. Portanto, todas as condições devem ser monitoradas com o intuito do processo ser mais eficiente e para isso devem ser realizados análises e testes ao longo dessa etapa, sendo a faixa ótima de temperatura entre 28 e 32°C. (PEREIRA; MACRI; GIMENEZ, 2020).

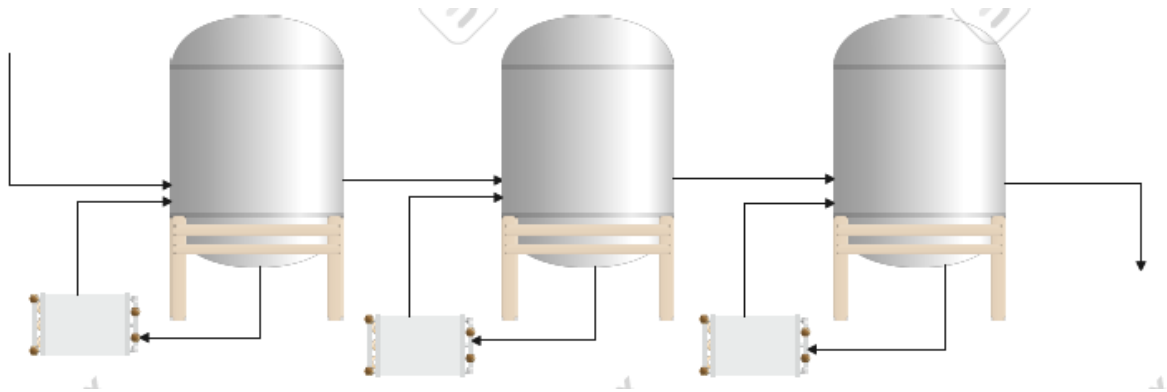
Segundo Góes-Favoni et al., (2018), o processo fermentativo pode ser dividido fundamentalmente em três partes, a primeira delas é a preliminar, que tem seu início assim que as células são adicionadas ao substrato e ocorre uma intensa multiplicação celular onde o açúcar é consumido para tal multiplicação, nessa etapa ocorre uma elevação na temperatura e o tempo de duração pode variar de acordo com as características do meio e das leveduras. A etapa posterior é iniciada no momento em que há uma grande quantidade de dióxido de carbono sendo desprendido, gerando uma grande agitação da solução e formação de espumas, essa fase também é marcada pela elevação abrupta da temperatura, que pode ser controlada pelo uso de trocadores de calor, e seu fim é caracterizado pela diminuição do desprendimento de gás carbônico. A última fase é a complementar, em que há uma diminuição da agitação da solução e formação de espuma, da temperatura e principalmente redução do teor de açúcares, tendo uma duração de aproximadamente oito horas.

O processo fermentativo pode ocorrer de forma contínua ou descontínua. A alimentação é realizada no primeiro tanque onde são misturados a solução e leveduras que foram adicionados a partir de uma vazão constante, que é a mesma vazão de saída do processo, e a solução passa pelos próximos reatores até que todos os açúcares sejam consumidos. (MEDEIROS, 2019). O processo semi-contínuo é realizado também em reatores associados em série, porém a fermentação ocorre no primeiro reator inoculado, ao final do processo retira-se do reator parte do volume do mosto fermentado e adiciona-se uma parte retirada do reator



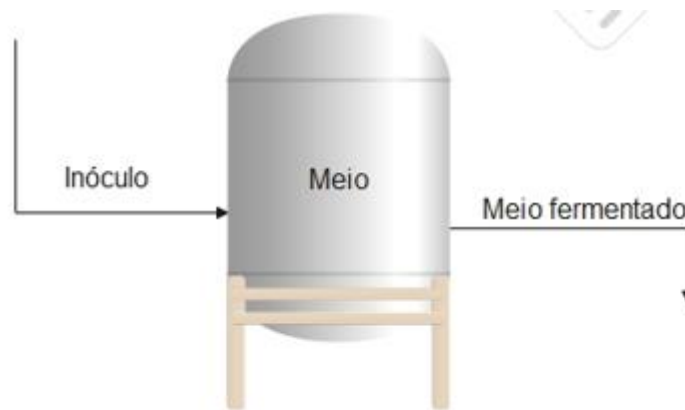
seguinte, que serve como um novo inóculo ao reator, esse processo se mantém até que haja uma queda na sua produtividade (FERNANDES, 2019). Na figura 7 é esquematizado a sequência de reatores utilizados nos processos contínuos e semi-contínuos.

Figura 9 – Esquema do processo fermentativo de forma contínua para a produção de etanol.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 10 – Esquema do processo fermentativo de forma batelada para a produção de etanol.



Fonte: Do Autor (2023).

Quando ocorre de forma descontínua, o processo pode ser chamado de batelada, e consiste na adição da solução de açúcares em um tanque de fermentação que é inoculado com a adição das leveduras. Nesse processo todos os elementos essenciais, como nutrientes, água, substrato e leveduras são adicionados nos reatores antes que a fermentação tenha início, sendo que apenas o oxigênio, soluções para controle de pH e antiespumante podem ser adicionados

durante sua realização, sendo mantido constante o volume do reator. Após o final do processo tudo é retirado do tanque e encaminhado para a próxima etapa, sendo realizados processos rigorosos de esterilização, já que em caso de contaminação por microrganismos, toda a fermentação pode ser afetada, formando produtos indesejáveis ou com baixo rendimento (MEDEIROS, 2019).

Segundo Vanzella et al. (2014) o sistema Melle-Boinot ou batelada alimentada, que consiste na adição de nutrientes ao reator durante o processo e os produtos só são retirados do tanque ao final do processo, é o mais utilizado. Esse processo consiste na recuperação e reutilização das leveduras ao final do processo, onde as leveduras passam por uma centrífuga e por um tratamento para que possam ser utilizadas novamente em outras bateladas.

Porém, durante a produção de etanol de milho, não é possível que se realize essa separação, devido a propriedades físicas do mosto do milho, as leveduras não podem ser separadas do vinho fermentado. Em usinas que são capazes de processar o etanol de milho e cana-de-açúcar, é possível que seja feito um aproveitamento das leveduras recuperadas do etanol de cana para o processo com milho, o que pode gerar a diminuição de custos, desde que as leveduras apresentem alto potencial de conversão e rendimento. Nas usinas que não são integradas, devem ser adquiridas novas leveduras a cada processo, o que pode gerar um custo adicional. Outro ponto a ser destacado é que o tempo gasto na fermentação do etanol de milho é maior do que o processo que utiliza cana-de-açúcar como matéria-prima. (BELLUCO; ALCARDE, 2008).

## **5.5 Destilação**

Após a fermentação é realizada a última etapa para a produção de etanol de milho, que é a destilação que consiste na separação do etanol dos outros componentes que estão presentes na mistura. O mosto quando chega nessa etapa recebe a denominação de vinho fermentado. A destilação se dá por meio das diferenças dos pontos de ebulição e ocorre aquecendo-se a mistura em uma coluna. A destilação realizada para o milho é similar ao do etanol de cana-de-açúcar, porém no vinho derivado do milho, encontram-se maior quantidades de sólidos presentes. (RIBEIRO, 2023).

Na saída do processo de destilação é obtido o etanol hidratado, que ainda contém uma certa quantidade de água, cuja composição é de 96% de etanol. Parte desse etanol passa por um processo de desidratação, já que se trata de uma mistura azeotrópica, não sendo possível

promover a separação do etanol e água. Uma das formas de promover tal separação é com a adição de ciclohexano na mistura, já no Brasil atualmente as peneiras moleculares vêm sendo amplamente utilizadas, pois é um método bastante eficaz. Existem outros métodos que podem promover essa desidratação, como a destilação extrativa com monoetilenoglicol (MEG). Após isso, o produto obtido é uma solução que contém 99,6% de etanol (MATOS, 2021).

Como não é possível que se separe as leveduras na fermentação, é necessário que seja realizada uma filtração com as leveduras e os grãos que ficaram retidos no fundo da coluna de destilação. Essa parte da mistura é centrifugada e desse modo, se o processo for contínuo as leveduras podem ser recuperadas para serem reutilizadas no processo (FERNANDES, 2019).

As colunas de destilação podem ser construídas de diferentes formas, em especial no formato dos pratos, que podem ser perfurados ou não, uma vantagem nas colunas com pratos perfurados, pois sua limpeza pode ser realizada de forma mais fácil, já que durante o processo podem ocorrer muitas incrustações. Com as perfurações é possível que se conduza o processo com maiores variações nas vazões sem perder eficiência, sendo alcançados valores de eficiência de até 99% durante a destilação (NOGUEIRA, 2021).

## 6 COPRODUTOS

Durante a produção do etanol de milho além dos produtos principais etanol hidratado e anidro também são gerados coprodutos que podem agregar valor para o processo produtivo, já que estes podem ser aproveitados e comercializados para fins agroindustriais e também alimentares, podendo ser aplicados até mesmo nas indústrias farmacêutica, cosmética e veterinária (MATOS, 2021). A geração de coprodutos é influenciada pela via de moagem, sendo seu processamento a seco ou úmido. Desse modo, os coprodutos são específicos de cada técnica e, portanto, se faz necessário tal conhecimento para abordar as características de cada um desses coprodutos gerados (ANTUNES, 2020).

De acordo com a Tabela 2, as receitas dos coprodutos de usinas *full* de milho representam aproximadamente 17% do valor total que é obtido.

Tabela 2 – Receitas e custos dos coprodutos da produção de etanol de milho.

Receitas	(%)	Custos	(%)
Etanol de Milho	83,00	Milho	68,00
DDG/WDG	13,00	Biomassa	10,00
Óleo	2,00	Mão de obra	4,00
Energia	1,00	Enzimas e ácidos	6,00
Outros	1,00	Outros	1,00

Fonte: Adaptado de UNEM (2023).

De acordo com a Tabela 3 a produtividade total de etanol chega a quase 400 litros produzidos para cada tonelada de milho que é processada, e sendo aproximadamente produzidos 110 quilogramas de DDG e WDGS para cada tonelada processada e cerca de 13 litros de óleo bruto ou óleo de milho pra cada tonelada. Desse modo, pode-se observar que a quantidade de coprodutos gerados representa juntos mais de 50% do volume total de etanol produzido, sendo esses tão importantes para a cadeia produtiva.

Tabela 3 – Valores da produção de etanol de milho e coprodutos.

Etanol total	399,27	L/ton
DDG	110,58	Kg/ton
WDG	112,80	Kg/ton
Óleo bruto	13,74	L/ton

Fonte: Adaptado de Silva, Santos, Nogueira Junior e Vian (2020).

### 6.1 Óleo de milho

Durante o processamento da moagem por via seca, na etapa destilação, o produto restante no fundo na coluna é chamado de vinhaça bruta e possui uma quantidade muito grande de sólidos em suspensão. Devido a isso, essa vinhaça passa por um processo onde é centrifugada para que haja a separação da água residual de destilação, denominada vinhaça fina e dos sólidos, que são os grãos de destilaria ou torta úmida. A parte da vinhaça fina passa por evaporadores que geram o xarope de milho, de onde é extraído o óleo de milho. (RIBEIRO, 2023).

Nas usinas de etanol de milho, estima-se que para cada tonelada de milho que é processado, são geradas 13,74 toneladas de óleo de milho. Seus principais usos são para produção de ração animal, fabricação de outros biocombustíveis, na indústria química, na alimentação animal e até mesmo para a fabricação de tintas e podendo ser utilizado como um substituto ao óleo de soja (UNEM, 2023). Na safra 2019/2020 foram produzidas cerca de 15,1 mil toneladas de óleo de milho como coproduto do etanol de milho. (UNEM, 2021).

O óleo de milho apresenta em sua composição elevadas concentrações de ácidos graxos fitoesteróis e tocoferóis, que são substâncias com propriedades antioxidantes naturais, que podem evitar que haja degradação oxidativas dos óleos e de sucessores, como por exemplo o biodiesel. Contudo, essa composição pode variar a depender do clima, solo, do grão e da quantidade de ácidos graxos de cadeia insaturada que estão presentes naquele óleo (VIEIRA, 2022).

### 6.2 DDG ou DDGS

O DDG (*Distilled Dried Grains*), grão de destilaria seco e o DDGS (*Distilled Dried Grains with Solubles*), que são os grãos de destilaria secos com solúveis, são coprodutos gerados quando se faz o processo de moagem por via seca (LEITE, 2018). Durante o processo

de destilação, o produto de fundo possui uma grande concentração de sólidos suspensos, tais sólidos passam por um processo de separação em uma centrifuga, onde é formada uma torta, que é combinada ao xarope de milho e seca até atingir valores de umidade entre 10 a 14%, sendo gerado o DDG (GRIPPA, 2012). Seu descarte incorreto pode causar prejuízos ambientais, econômicos e sanitários (WU; MUNKVOLD, 2008).

Segundo Bizuca (2020) o DDG apresenta altas concentrações de proteínas, lipídeos e minerais, além de ser fonte de nutrientes. Isso faz com que esse coproduto possa ser utilizado na alimentação animal, para a produção de rações para bovinos, suínos e aves. Além de ser uma matéria-prima de baixo custo, pois se trata de um resíduo da produção de etanol de milho. Porém um desafio para sua utilização para a produção de ração animal é a quantidade de nutrientes que estão presentes nos grãos, já que estes são facilmente influenciados pelas condições do processo e seus níveis podem ser bastante variados.

Além disso, segundo Moreira et al. (2020), é possível que as áreas utilizadas para grãos como soja e milho que são destinadas para a produção de ração animal sejam diminuídas com o aumento da utilização de DDG e DDGs para tal finalidade, sendo que tais produtos podem ser direcionados como matéria-prima para outras indústrias, como alimentícia. São gerados aproximadamente 110 kg de DDG a cada tonelada de milho que é processada para geração de etanol (SILVA; SANTOS; NOGUEIRA JUNIOR E VIAN, 2020). Na safra 2019/2020 foram geradas cerca de 469,8 mil toneladas de DDG e DDGs nas usinas de etanol brasileiras (UNEM, 2021). Apesar de seu maior custo de produção, o DDG apresenta vantagens como maior estabilidade e maior tempo de shelf life.

### **6.3 WDG ou WDGS**

Esses coprodutos, os grãos úmidos de destilaria (*Wet Distillers Grains*) sem e com adição de solúveis tem a mesma origem do DDG, a partir dos sólidos suspensos restantes da destilação que são centrifugados, a diferença em relação ao DDG é que o WDG não é sujeito a processos de secagem, então apresenta valores maiores de umidade (TOMAZ, 2019). Tais coprodutos também apresenta altos níveis de proteínas, aminoácidos e nutrientes.

Devido ao seu alto nível de umidade há uma maior dificuldade em transportar esses resíduos e sua conservação deve ser feita de maneira mais adequada, já que podem ocorrer contaminações por microrganismos, bactérias ou fungos que podem deteriorar os produtos,

tornando-os impróprios para uso ou consumo, cujo utilização principal, assim como o DDG, é para a alimentação animal, sendo insumo para produção de rações para bovinos, suínos e aves, porém também apresentam variações na sua composição nutricional, o que pode ser implicado por variações no processo. A vantagem de utilizar esse coproduto está em seu custo de compra, que apresenta menores valores quando comparado ao DDG (BIZUCA, 2020).

## 7 ETANOL DE MILHO X ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR

O etanol é um biocombustível que tem sua demanda produtiva cada vez maior no mundo todo. Tal fato torna importante e necessária a exploração de novas rotas tecnológicas, principalmente de novas matérias-primas que possam contribuir para o aumento da produção. As matérias-primas podem ser classificadas em três grupos que acordo com os tipos de açúcares que estão presentes, sendo eles: celulósicos, como o bagaço de cana-de-açúcar ou palha de milho; amiláceas, como o milho, trigo e mandioca; sacaríneos, como a cana-de-açúcar ou beterraba. Os principais insumos utilizados atualmente são o milho na América Anglo saxônica e a cana-de-açúcar na América Latina, mas outras matérias-primas já são utilizadas, como a beterraba na Europa (ABDALA, 2018; BORGES 2018).

Tabela 4 – Dados de produtividade de etanol de diferentes matérias-primas.

Matéria-prima	Produtividade média de biomassa(ton/ha)	Eficiência de conversão de etanol (L/ton)	Rendimento médio por área (L/ha)	Custo médio da biomassa (R\$/ha)
Milho	7,5-10	360-460	3650	5610,78
Beterraba	13-100	100-110	6150	16000,00
Cana-de-açúcar	50-120	70-90	7150	313,88

Fonte: Adaptado de ROSSETO et al. (2017).

Na Tabela 4 estão expressos dados de três matérias-primas diferentes, sendo elas milho, beterraba e cana-de-açúcar, esses dados são para produtividade média da biomassa em tonelada por hectare, o qual a cana-de-açúcar apresenta valores superiores ao do milho, o que indica que é necessário para a produção de etanol de milho uma área maior de cultivo, quando comparada ao etanol da cana. Já para eficiência de conversão de etanol em litro por tonelada de matéria-prima processada, o milho apresenta valores superiores ao da cana. Tal fato é uma vantagem para o etanol de milho, já que seu rendimento, ou seja, a produção de etanol a partir da conversão dos açúcares presentes na matéria-prima é maior, e segundo Rosseto et al. (2017) podendo ser obtidos até 460 litros por tonelada de milho processada, já para a cana podem ser obtidos apenas 90 litros por tonelada de matéria-prima processada.

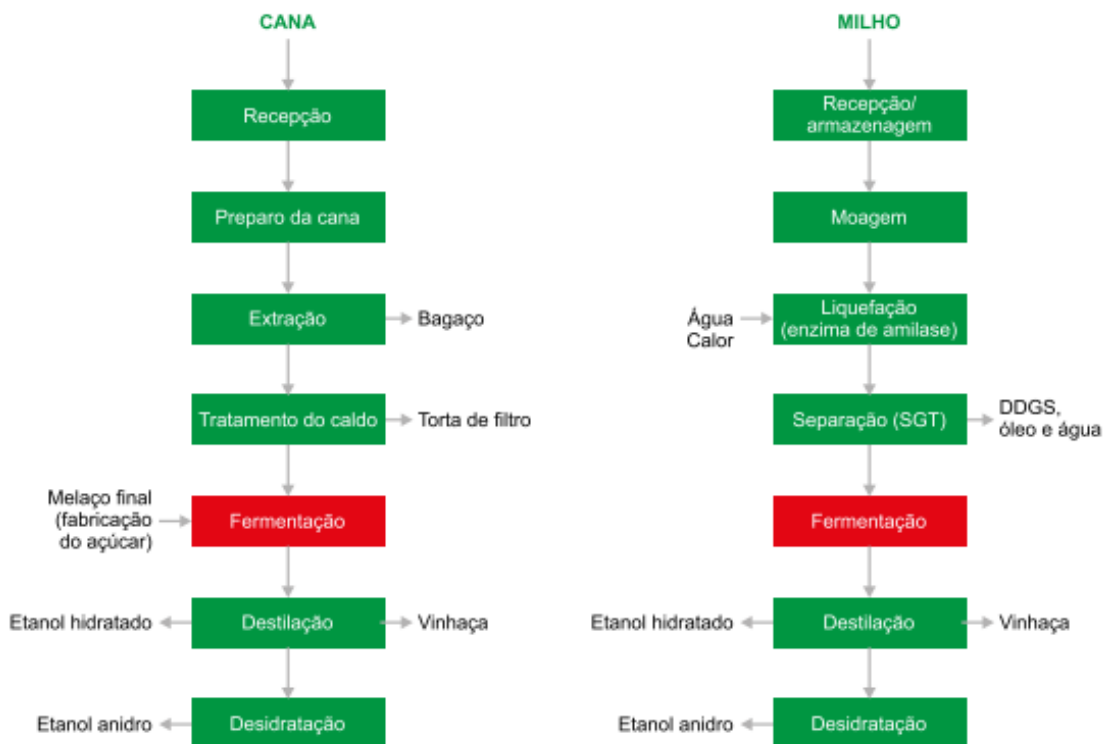


Ainda de acordo com a Tabela 4, é possível notar que a cana-de-açúcar se trata da matéria-prima mais barata e com maior rendimento por hectare no Brasil, tal fator influencia o maior uso da biomassa para geração de etanol no país.

Além disso, o processo produtivo do etanol pode ser dividido em quatro etapas, sendo elas: preparo das matérias-primas, obtenção do substrato que será fermentado, fermentação e destilação, as primeiras etapas são diferentes a depender da matéria-prima, já as etapas de fermentação e destilação são comuns e similares no processamento do etanol de cana e milho (OLIVEIRA; SERRA; MAGALHÃES, 2012).

Na Figura 7 são apresentados os processos produtivos para o etanol de cana e milho, respectivamente. De acordo com Silva et al. (2020), as três últimas etapas do processo são iguais e são gerados os mesmos produtos ao final de cada uma delas, sendo o etanol hidratado gerado após a destilação e o etanol anidro gerado após a desidratação. Porém, os processos apresentam diferenças logo nas etapas de recepção, já que a cana não pode ser estocada por períodos maiores como o milho, sendo possível armazená-la por no máximo 180 dias. Na etapa posterior o milho é submetido a uma moagem de seus grãos para facilitar os próximos processos, principalmente a extração do amido, já a cana passa por uma etapa onde é preparada sendo sujeita a limpeza e lavagem para que possa ocorrer a extração do caldo nas moendas, obtendo-se o bagaço que pode ser reutilizado para a geração de energia ou de etanol de segunda geração, esse caldo deve ser tratado, para que possa finalmente ser fermentado. E o milho após a moagem passa por uma etapa de hidrólise, que é dividida em três fases, sendo a principal delas a liquefação que ocorre por meio da catálise enzimática, a etapa posterior é a separação de alguns coprodutos para fermentação do mosto.

Figura 11 – Comparação entre o processo produtivo do etanol produzido a partir de cana-de-açúcar e de milho.

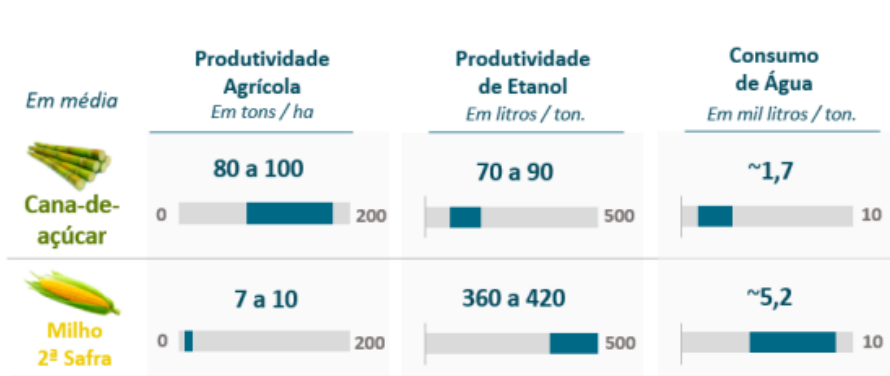


Fonte: Silva, Santos, Junior, Vian (2020).

Outra diferença apresentada é a geração de coprodutos. Na produção de etanol de cana é gerado o bagaço após a moagem, em muitas usinas esse bagaço é usado para produzir energia para a própria instalação, tornando muitas delas autossuficientes energeticamente, além disso, esse bagaço pode ser utilizado para a geração do etanol de segunda geração. Outro coproduto gerado é a torta de filtro que é geralmente usada na própria lavoura de cana como fertilizante, pois contém uma quantidade significativa de nutrientes, a vinhaça também pode ser utilizada com a mesma finalidade, essa é uma grande vantagem já que as usinas podem ter benefícios financeiros a partir disso (MARCHETTI, 2023; NUNES, 2017).

Já o etanol do milho tem como principais coprodutos o óleo de milho, DDG e WDG, que são utilizados principalmente para alimentação animal através da produção de ração, devido aos seus níveis elevados de nutrientes e proteínas. Porém, esses coprodutos podem variar a depender da via que é utilizada na moagem (LAURENT, 2016).

Figura 12 – Comparativo da produção de etanol de cana-de-açúcar e milho.



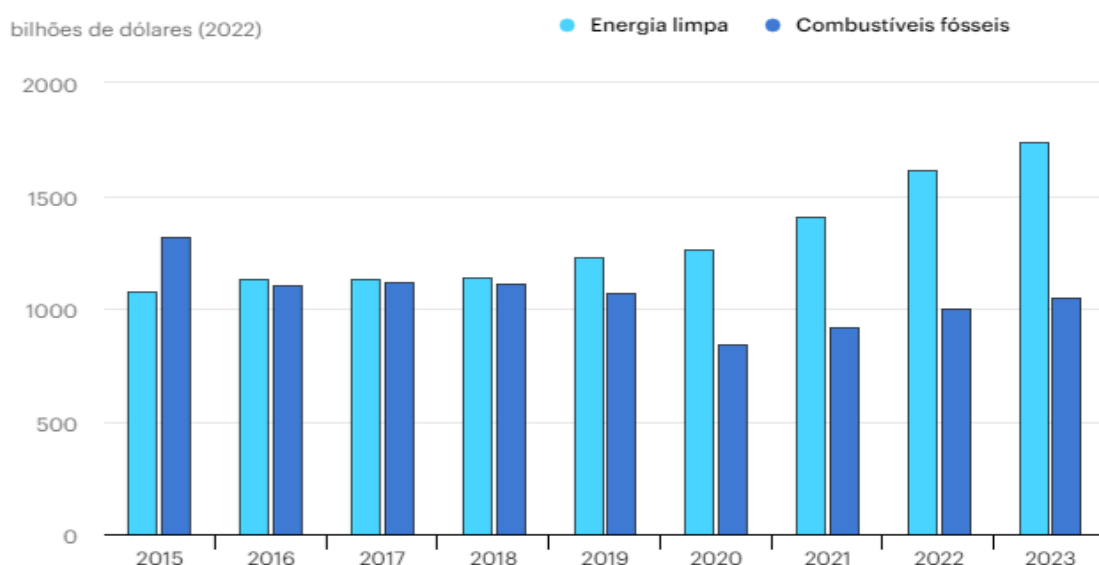
Fonte: Neves et al. (2022).

## 8 CENÁRIO MUNDIAL

Segundo dados do EIA (*U.S Energy Information Administration*) (2023), o consumo de energia e combustíveis está aumentando no mundo todo. Isso se deve ao aumento populacional e também aumento do PIB, devido ao crescimento econômico, atrelado a isso, as preocupações com as questões ambientais estão sendo cada vez maiores, o que implica no aumento do consumo de combustíveis de origem não fóssil. A projeção de aumento do consumo de combustíveis renováveis no mundo sobe de 21% em 2022 para 34% em 2050.

De acordo com dados da IEA, o investimento em energia limpa, dentre eles o etanol, aumentou de forma substancial no mundo. Em 2018 por cada dólar investido em combustíveis fósseis, eram investidos o mesmo capital em combustíveis de origem renovável, já em 2023 para cada dólar investido em combustíveis fósseis, foram investidos 1,70 dólar em combustíveis renováveis.

Figura 13 – Investimento em energia limpa e combustíveis fósseis ao longo dos anos.



Fonte: Adaptado de IEA (2023).

O país que mais utiliza etanol no mundo é o Estados Unidos, além disso, é o país que mais produz, e juntamente com o Brasil representam cerca de 70% do consumo mundial de etanol. Em 2019, os Estados Unidos consumiram cerca de 55,7 bilhões de litros do combustível, outros países como China e a União Europeia também são grandes consumidores desse

combustível, sendo consumidos por esses países, respectivamente, 10,6 e 6,7 bilhões de litros em 2019. (NEVES et al., 2021).

Figura 14 – Comparação do consumo de etanol no mundo em 2018 e perspectivas para 2030.



Fonte: Neves et al. (2021).

O milho é a matéria-prima mais utilizada mundialmente para a produção de etanol, sendo o maior produtor os Estados Unidos que representam 54,9% da produção, além de ser o maior exportador do produto que é vendido para Canadá, Índia e Coreia do Sul, principalmente. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor seguido da União Europeia que geram cerca de 8 bilhões de litros de etanol, que também produz o etanol com o milho, porém, com a guerra da Ucrânia e Rússia, esse grão está com um custo elevado, o que gera uma retardação da produção do biocombustível na região. A China também é uma grande produtora, porém sua produção em 2021 foi reduzida em 7,5%, a causa foi o aumento do preço do milho, gerado pela sua baixa produtividade (VIDAL, 2022).

Os Estados Unidos se tornaram o maior produtor de etanol do mundo somente em 2006, quando sua produção ultrapassou a brasileira e somente a partir de 2010 iniciaram suas exportações (HETTINGA et al., 2009). Atualmente mais de um terço da sua produção de milho é destinada para a produção de etanol e cerca de 94% de todo etanol produzido no país tem o milho como matéria-prima. Porém, com a pandemia de Covid – 19, houve uma redução do consumo e produção em 2020 e 2021, tendência que pode ser percebida em todo mundo. Porém em 2022 houve um aumento da produção e somente nos Estados Unidos foram produzidos mais de 58 bilhões de litros do biocombustível (HOSSAIN; JANZEN, 2022).

Tabela 5 – Dados da produção de etanol de milho no mundo em milhões de litros.

Países	2017	2018	2019	2020	2021	%
Estados Unidos	60324	60911	59726	52772	56781	54,9
Brasil	25589	30586	33274	60586	28391	27,5
União Europeia	4997	5148	5224	4770	4921	4,8
China	3218	3066	3823	3520	3255	3,1

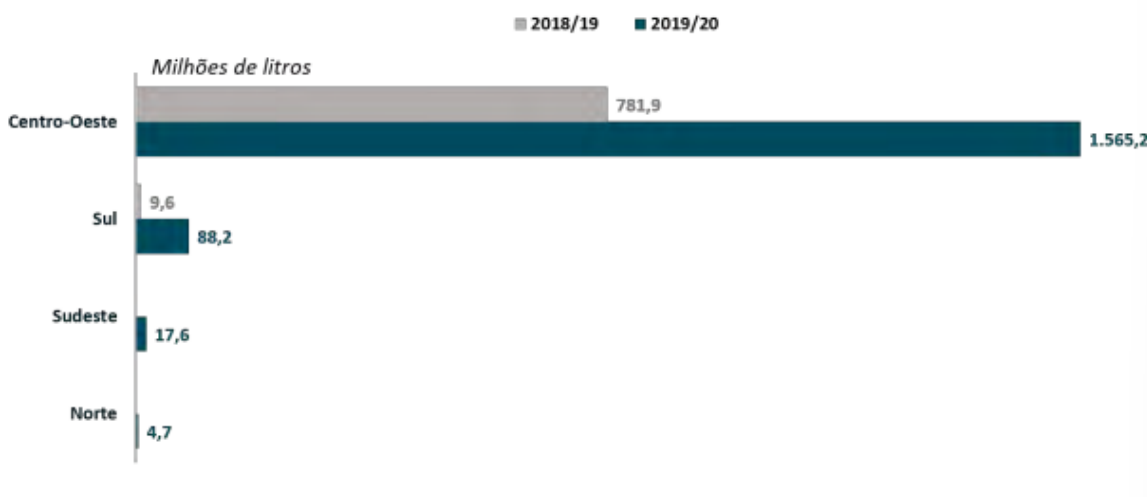
Fonte: Adaptado de Vidal (2022).

Na América Latina, a primeira usina de etanol de milho instalada foi a Inpasa, em 2007, no Paraguai, e em 2019, a mesma empresa se instalou no Brasil, na cidade de Sinop, no Mato Grosso. Atualmente, a empresa possui cinco unidades produtoras, sendo duas delas no Paraguai e três no Brasil, somando a produtividade das cinco unidades a empresa é a maior produtora de etanol de milho da América Latina (INPASA, 2023).

## 9 CENÁRIO BRASILEIRO

Segundo a Forbes (2023) foram produzidos 4,39 bilhões de litros de etanol de milho na última safra. No Brasil, a maior parte do etanol é produzida a partir da cana-de-açúcar, porém nos últimos anos, a produção de etanol de milho vem se expandindo, na safra 2022/2023 o etanol de milho representava 15% do volume total do biocombustível no país, e a previsão é que na próxima safra esse valor aumente ainda mais e chegue em 17%. Os estados do centro oeste são os maiores produtores, sendo que Mato Grosso representa sozinho 75% da produção nacional, já que grande parte da produção de milho está localizada na região e devido a localização e distância de portos, o transporte do grão é mais difícil na região (ÚNICA, 2023).

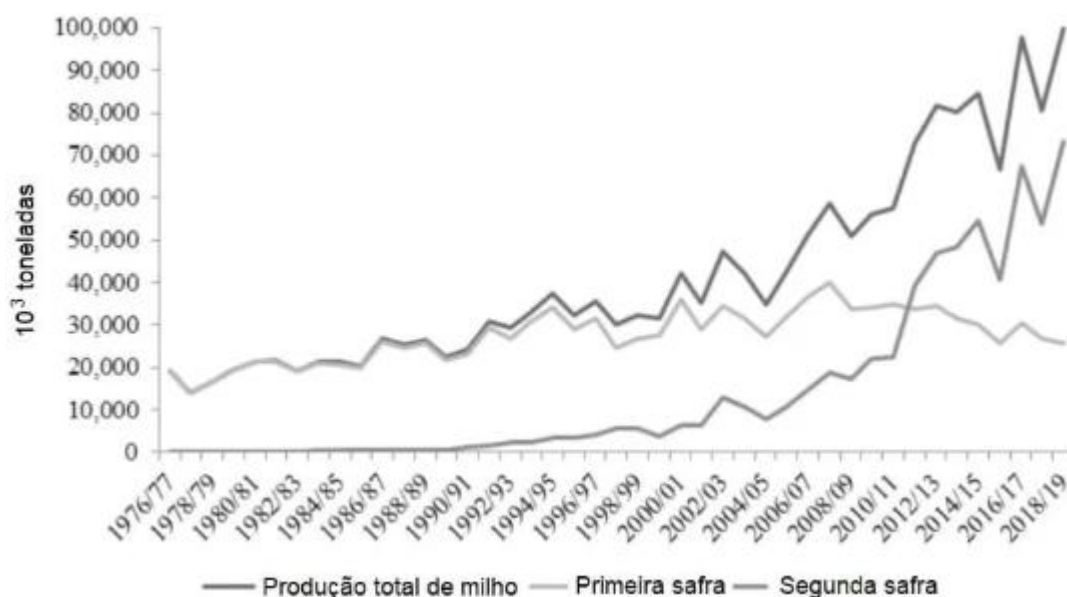
Figura 15 – Dados da produção de etanol de milho dividido por região.



Fonte: UNICA (2023).

A produção brasileira se diferencia da que acontece em outros países pelo fato de que aqui o milho é de segunda safra, e, portanto, não há competição com as outras culturas agrícolas, além disso, o país tem a terceira maior produção mundial de milho, tais fatores contribuem para o crescimento da produção de etanol de milho (ÚNICA, 2023).

Figura 16 – Produção de milho no Brasil, dividido em produção total, de primeira e segunda safra.



Fonte: Silva, Castaneda-Ayarza (2021).

A primeira usina instalada e com capacidade produtiva para etanol de milho no país, era uma usina no modelo *flex* e sua produção teve início em 2012, onde eram processados etanol de cana-de-açúcar e milho, tal usina era a USIMAT e foi instalada no Mato Grosso. Somente em 2017 foi inaugurada uma usina *full*, que produzia etanol que possuía apenas o milho como matéria-prima, a *FS Fueling Sustainability* (SILVA; CASTANEDA-AYARZA, 2021.)

No último ano, segundo dados da ANP (2023), foram processados cerca de 8,4 milhões de toneladas de milho para produção de etanol, sendo que os estados produtores são Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná. Atualmente no país estão instaladas 18 usinas em operação.

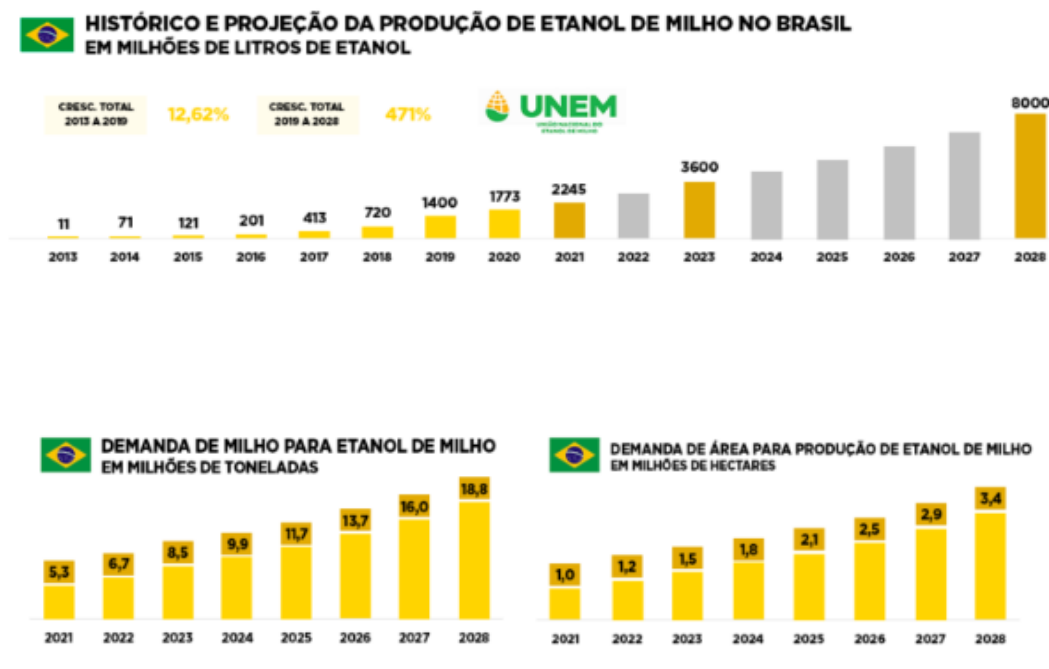


## 10 PERSPECTIVAS

A demanda por combustíveis está em alta em todo o mundo, portanto nos próximos anos espera-se que a produção e o consumo aumentem. No Brasil, um exemplo disso é o número de carros que possuem modelo *flex* que devem ter um aumento até 2030. A projeção para a produção de etanol de milho é que seja atingida a marca de 8 bilhões de litros de etanol até em 2028 no país. Espera-se que sejam investidos no setor cerca de 15 bilhões de reais até 2030, e que sejam instaladas 10 novas usinas, ampliando a produção de etanol de milho no país para 10 bilhões de litros até no mesmo ano (FORBES, 2023).

A tecnologia é um fator importante que promoverá um impulso na produção de etanol de milho, um exemplo disso é o reaproveitamento de leveduras no processo de etanol de cana, tais leveduras podem ser reutilizadas na produção de etanol de milho naquelas usinas que operam com as duas matérias-primas, o que além de benefícios financeiros, promove uma redução expressiva no tempo de fermentação. Segundo Silva, Castaneda-Ayarza (2021), a fermentação em usinas americanas leva em torno de 45 a 60 horas, enquanto nas usinas brasileiras que fazem o reaproveitamento das leveduras, o tempo é reduzido a 34 a 36 horas, sendo desse modo, o processo 66% mais rápido, e sem perda de eficiência.

Figura 17 – Produção de etanol de milho no Brasil ao longo dos anos.



Fonte: UNEM (2023).

Uma nova biorrefinaria de etanol de milho será instalada na Bahia, e terá capacidade de processar cerca de 1,7 mil toneladas de milho por dia, que funcionará a partir do processamento de moagem por via seca. Nessa planta serão produzidos 260 milhões de litros de etanol anidro anualmente, e como principal coproduto, serão geradas cerca de 9 mil toneladas de óleo de milho por ano. O início de seu funcionamento está previsto para o primeiro trimestre de 2025, a biorrefinaria será construída a partir de uma parceria entre uma empresa dos Estados Unidos, a ICM, que será a responsável pelo fornecimento dos equipamentos e tecnologia, visto que nos Estados Unidos a produção de etanol de milho é dominante, por consequência no país, a tecnologia apresenta maiores avanços e a empresa brasileira Impacto Energia será a responsável por operar a biorrefinaria (ABRAMILHO, 2022).

## 12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo feito através de pesquisas bibliográficas realizadas, foi possível apresentar as características das biorrefinarias e usinas de etanol de milho e suas principais classificações, além de seu processo produtivo, com ênfase em cada etapa, sendo elas: o preparo da matéria-prima, moagem, hidrólise, fermentação e destilação, destacando os coprodutos e as etapas em que são gerados, visando sua importância econômica e nutricional quando associados a alimentação animal.

É notório após a realização do presente trabalho que nos próximos anos, a tendência é que o consumo de biocombustíveis aumente cada vez mais, principalmente o etanol, e em especial, o etanol de milho, visto que os combustíveis fósseis não são uma opção sustentável frente as mudanças climáticas que estão acontecendo nas últimas décadas. No mundo, a produção de etanol em sua maioria já é proveniente de milho, mas no Brasil, a principal matéria-prima é a cana-de-açúcar. Entretanto, o etanol de milho vem ganhando mais espaço no mercado e sua produção pode ser uma opção ao setor sucroalcooleiro, já que quando são associadas as duas produções, seja nas usinas *flex* ou *flex full* vê-se um grande benefício, pois durante os períodos de entressafra de cana, quando não se há matéria-prima disponível, não é necessário parar a produção, obtendo, dessa forma um maior lucro.

Ademais, foi possível notar algumas semelhanças entre as etapas produtivas dos dois tipos de etanol, sendo a etapa principal de ambos a fermentação que é responsável pela conversão dos açúcares em etanol, porém existem algumas divergências, como os coprodutos gerados e suas utilidades.

Devido ao aumento da produção de etanol de milho, um dos cenários é que haja uma expansão dos estados produtores, que hoje tem sua concentração nos estados do centro-oeste do país, e as perspectivas são que a partir dos próximos anos, a produção se estenda a estados do sudeste, sul e nordeste, com a instalação de novas usinas e também de biorrefinaria.

## REFERÊNCIAS

- ABIMILHO – Associação Brasileira das Indústrias do Milho. Disponível em: <https://www.abimilho.com.br/>. Acesso em 24 de outubro de 2023.
- ABDALA, T. O. **Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. 2017.
- ALBERTON, R. P. **Etanol 2g: processo produtivo e seu contexto atual no Brasil**. Monografia (Graduação em Economia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 2009.
- ALVIM, J. C., et al. **Biorrefinarias: Conceitos, classificação, matérias primas e produtos**. J. Bioen. Food Sci., v. 1, n. 3, p. 61-77, 2014.
- ANTUNES, S. L. **Inclusão de novos coprodutos derivados do processo de produção de etanol de milho em dietas de terminação de bovinos**. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens). Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP. 2020.
- BASTOS, V. D. **Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias**. BNDES, n. 25, p. 5-38, 2007.
- BELLUCO, A. E. S.; ALCARDE, A. R. **Cana e milho: métodos distintos convergem ao etanol**. Revista Visão Agrícola, n. 8, p. 50-52, 2008.
- BESERRA, Y. A. S. **Caracterização físico-química do farelo de milho (Zea mays L.) como subproduto visando seu aproveitamento na alimentação animal**. Monografia (Graduação em Química Industrial). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande/PB. 2015.
- BIZUCA, R. R. de S. **Etanol de milho e seu coproduto dddg na nutrição de bovinos terminados em confinamento**. Monografia (Graduação em Zootecnia). Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia/GO. 2020.
- BORGES, J. R. M. **Obtenção de bioetanol por fermentação a partir do milho**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberaba, Uberaba/MG. 2018.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. **Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente**. Visão Agrícola, n. 13, p. 135-137, 2015.
- CONAB, 12º Levantamento - Safra 2022/23. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em 8 de novembro de 2023.
- D'ARCE, M. A. B. R.; SPOTO, M. H. F.; CASTELLUCCI, A. C. L. **Processamento e industrialização do milho para alimentação humana**. Visão Agrícola, Piracicaba/SP, n. 13, p. 138-140, jul./dez. 2015.
- NEVES, F. M., et al. **Etanol de milho cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. UNEM, 2021.
- EIA - Energy Information Administration. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/>. Acesso em: 16 de outubro de 2023.
- EMBRAPA. Disponível em <https://www.embrapa.br/>. Acesso em 15 de outubro de 2023.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 14 de dezembro de 2023.

FERNANDES, R. **Avaliação da produção de etanol empregando milho como matéria-prima**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. 2019.

FONSECA, M. J. de O. – **Embrapa Agroindústria de Alimentos. Secagem e Armazenamento**. Dez. 2021.

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

GONÇALVES, A. Z. L. **Produção de alfa-amilase e glucoamilase termoestável pelo fungo termofílico *Thermomyces lanuginosus* TO-03 por fermentação submersa e em estado sólido e caracterização das enzimas**. 2006. p. 37- 63. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas: Microbiologia Aplicada) - Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

GRIPPA, M. J. C. **Planta flex no Mato Grosso**. MBA (Pós Graduação em Gestão de Agronegócio). Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR. 2012.

HOSSAIN, S.; J. JANZEN. **O impacto dos declínios de longo prazo no uso de gasolina no mercado de milho dos EUA**. 2022.

INPASA. “**Nossa História**”. 2023. Disponível em: <<https://www.inpasa.com.br/institucional/nossa-historia/452376>>. Acesso em: 04 jan. 2023.

LEITE, R. G. **Uso de ddgs na suplementação protéico energética em bovinos em pastejo na estação chuvosa**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal/SP. 2018.

LONGATI, A. A. **Implementação de unidade de processo para geração de energia empregando vinhaça e integração na biorrefinaria de produção de etanol**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP. 2018.

LOPES, P. H. S. et al. **Hidrólise do amido de milho: liberação de açúcares fermentescíveis para fabricação de etanol**. **Microbiologia: clínica, ambiental e alimentos** 2, Ponta Grossa: Editora Atena, 2021,16 p.

LOPES, L. F.; SANTOS, M. S. M.; BATISTOTE, M. **A produtividade de milho no Brasil e avaliação do tratamento granulométrico para a produção de etanol**. Revista Desafios, v. 9, n.2, 2022.

MACEDO, I. de C. **O processamento industrial da cana-de-açúcar no Brasil**, p. 247-268. 2007.

MAGALHÃES, L. L. **Projeto de uma usina de etanol de 2ª geração**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP. 2022.

MARCHETTI, L. S. **Análise comparativa de uma planta de etanol de milho e de cana-de-açúcar**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP. 2023.

MARQUES, D. S. M. **Avaliação técnico-econômica da produção de etano via etanol obtido em uma usina flex de cana-de-açúcar e milho**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2019.

- MATOS, J. S. **Cenários prospectivos para a biorrefinaria de milho.** Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT. 2021.
- MEDEIROS, S. S. **Fermentação alcoólica empregando altas concentrações de açúcares.** Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/ MG. 2019.
- MELO, N. R. **Etanol 2g: processo produtivo e seu contexto atual no brasil.** Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. 2020.
- MERLIN, R. O. **A importância do etanol brasileiro no cenário mundial.** Monografia (Graduação em Comercio Exterior). Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí/SC. 2009.
- MILANEZ, A. Y, et al. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política.** BNDES, v. 41, p. 147-208, 2014.
- MOTA, C. J. A.; MONTEIRO, R. S. **Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis.** Revista Química Nova, v. 36, n. 10, p. 1483-1490, 2013.
- MONTEIRO, S. D. da S. C. **Produção de Biometano: Análise de Mercado e Estudo da Separação por PSA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade do Porto, 2011.
- MOREIRA, M. R.; SEABRA, J. E. A.; LYND, L. R.; ARANTES, S. M.; CUNHA, M. P.; GUILHOTO, J. J. M. **Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil.** Nature Sustainability, v.8, 2020.
- MUSSOLINI, R. C. **Caracterização físico-química e rendimento da moagem úmida de quatro híbridos de milho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto/SO. 2009.
- NALI, E. C.; RIBEIRO L. B. N. M.; HORA, A. B. **Do engenho à biorrefinaria. A usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis.** BNDES Setorial, v. 43, p. 257-294, 2015.
- NAVES R.F; FERNANDES F.S; PINTO O.G; NAVES P.LF. **Contaminação Microbiana nas Etapas de Processamento e sua Influência no Rendimento Fermentativo em Usina Alcooleira.** Enciclopédia Biosfera, 2021.
- NIDERA, milho. Disponível em <<https://www.niderasementos.com.br/milho/>>. Acesso em 13 de novembro de 2023.
- NOGUEIRA, L. C. **Produção de etanol de milho: efeito de híbridos, tempo e temperatura de armazenamento dos grãos.** Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). Universidade do Estado de Minas Gerais, Frutal/ MG. 2011.
- NUNES, E. F. **Cana-de-açúcar: a produção de etanol e seus benefícios.** Monografia (Técnico em Agronegócios). Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia de São Paulo, Barretos/SP. 2017.
- OLIVEIRA, L. S. B. L. de. **Produção integrada de etanol de cana-de-açúcar e milho em usinas flex: simulação e análises tecno-econômica e ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP. 2022.

OLIVEIRA, L. M.; SERRA, J. C. V.; MAGALHÃES, K. B. **Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol.** Revista Eletrônica do Curso de Geografia- UFG, n. 19, 2012.

PAES, M. C. D. **Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho.** Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, EMBRAPA, 2006.

PERES, J. R. R.; FREITAS JUNIOR, E.; GAZZONI, D. L. **Biocombustíveis: Uma oportunidade para o agronegócio brasileiro.** Revista de Política Agrícola, n. 1, 2005.

PEREIRA, D. A.; MACRI, R. C. V.; GIMENEZ, A. Z. **Fatores que afetam a fermentação alcoólica.** Revista Ciência e Tecnologia, v. 12, n.1, 2020.

PRADO, A. C. P.; SILVA, R. C.; OLIVEIRA, R. A. **O impacto do crescimento do ddd no Brasil nas exportações.** Revista Observatório Portuário, v.1, n.1, 2022.

RAMOS, L. P., et al. **Tecnologias de Produção de Biodiesel.** Revista virtual de química, v. 3, n. 5, p. 385-405, 2011.

RIBEIRO, L. M. L. **Etanol de milho: processo produtivo e contexto atual do mesmo no Brasil.** Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. 2023.

RODRIGUES, J. A. R. **Do engenho à biorrefinaria. A usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis.** Química Nova, v.34, n. 7, p.1242-1254, 2011.

ROSSETO, R. E., et al. **Panorama do etanol brasileiro.** II Seminário de engenharia de energia na agricultura, v. 6, n. 5, p. 13-22, 2017.

RUIZ, S. C. M. **Estruturas de Governança: Contratos de Fornecimento de biomassa para Biorrefinarias de Cana-de-Açúcar.** Dissertação (Mestrado em Economia Agrícola e do Meio Ambiente). Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP. 2021.

SANTOS, S. G. **Características nutricionais e físicas do milho com diferentes texturas e tempos de armazenamento.** Tese (Doutorado em Ciência Animal). Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2015.

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

SCIPIONI, G. C. **Otimização do processo de sacarificação do amido de batata (*Solanum Tuberosum L.*) utilizando enzimas amilolíticas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. 2011.

SILVA, B. C. R.; et al. **Uso do coproduto de etanol de milho na alimentação de aves: revisão.** Research, Society and Development, v. 10, n. 4, 2021.

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

SILVA, H. J. T.; SANTOS, P. F. A.; NOGUEIRA JUNIOR, E. C.; VIAN, C. E. de F. **Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil.** Revista de Política Agrícola, n.4, p. 142-159, 2020.

SILVA, R. F.; MASCARENHAS, M. S.; BATISTOTE, M. Biomass: bioethanol transformation and production process. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 9, n. 4, 8 p., 2022.

SUMIKAWA, V. I. O. **Avaliação da produção de etanol em usinas flex de cana-de-açúcar e milho**. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP. 2019.

TOMAZ, L. de A. **Grãos de milho úmidos de destilaria na alimentação de bovinos Nelore: Digestibilidade e parâmetros ruminais**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP. 2019.

UNEM – União Nacional do Etanol de Milho. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/home/associados/>. Acesso em 29 de setembro de 2023.

VANZELLA, E., et al. **Processo fermentativo na indústria sucroalcooleira**. Acta Iguazu, v. 3, n. 1, p. 50-58, 2014.

VÁSQUEZ, M. P. **Desenvolvimento de processo de hidrólise enzimática e fermentação simultâneas para a produção de etanol a partir de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2007.

VIEIRA, J. P. R. **Uso do DDGS obtido da produção de etanol de milho na síntese de biodiesel metílico por catálise básica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 2022.

VIDAL, M. F. **Agroindústria – Etanol**. Caderno Setorial ETENE, n. 237, 2022.

W.G. Hettinga, H.M. Junginger, S.C. Dekker, M. Hoogwijk, A.J. McAloon, K.B. Hicks, 2008.