



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



LAURA MÁRCIA LIMA RIBEIRO

**ETANOL DE MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E CONTEXTO ATUAL DO
MESMO NO BRASIL**

UBERLÂNDIA

2023

LAURA MÁRCIA LIMA RIBEIRO

**ETANOL DE MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E CONTEXTO ATUAL DO
MESMO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia Química como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro

UBERLÂNDIA

2023

LAURA MÁRCIA LIMA RIBEIRO

**ETANOL DE MILHO: PROCESSO PRODUTIVO E CONTEXTO ATUAL DO
MESMO NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Uberlândia, 02 de fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro

Orientador - FEQUI/UFU

Prof.^a Dra. Miriam Maria de Resende

FEQUI/UFU

Doutoranda Amanda Carmelo da Rocha

PPGEQ/UFU

Dedico esta monografia a minha mãe, que sempre me apoiou e me incentivou nessa etapa tão importante na minha vida. Sem ela nada seria possível! Sei que não foi fácil me criar e educar sozinha, mas graças a todo seu esforço, hoje estou podendo realizar meu sonho de me formar. Serei eternamente grata a tudo o que fez por mim e por nunca ter me abandonado mesmo nos momentos mais difíceis.

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores de etanol no mundo e diferentemente dos Estados Unidos da América que produz etanol a partir do milho, no Brasil o etanol é produzido quase em sua totalidade a partir da cana-de-açúcar. Apesar de ser muito consolidada no país e possuir alta produtividade, a cana-de-açúcar possui um período de entressafra extenso, deixando assim as usinas em um período ocioso de produção. Já o milho possui mais de uma safra anual no Brasil, sendo na última década, o crescimento dessas safras um dos propulsores do etanol de milho no país. Na Região Centro-Oeste, principalmente no estado do Mato Grosso, os grandes volumes de produção aliados com as dificuldades logísticas de armazenamento e escoamento do grão, levaram a implementação da primeira usina de etanol de milho do Brasil no ano de 2012. Atualmente no Brasil existem três tipos de usinas que utilizam o milho em seus processos produtivos: a usina Flex, onde o milho é utilizado na entressafra da cana; as usinas Full milho, projetadas exclusivamente para a produção do etanol de milho; e as usinas Full Flex, onde o milho e a cana são processados em paralelo em uma mesma planta produtiva. Nos últimos anos muitas usinas de milho foram implementadas no país e a previsão é que nos próximos anos os números sejam ainda maiores. O processamento a partir do milho traz grandes vantagens para o setor sucroenergético e agropecuário brasileiro. Isso porque além da produção de bioetanol ajudar a suprir a grande demanda de combustíveis, no processamento do etanol de milho temos importantes coprodutos como os DDG e WDG que podem ser utilizados em substituição ao farelo de soja na nutrição animal. Os processos de etanol de milho e cana-de-açúcar apresentam muitas semelhanças, mas apresentam também algumas diferenças, como as etapas adicionais de hidrólise do amido de milho, o tempo de fermentação, o tratamento dos grãos de destilaria e as condições operacionais, que são distintas em partes do processo. Nesse contexto, o presente estudo visa realizar um levantamento do processo de produção do etanol utilizando o milho como matéria-prima. Além disso, analisar o cenário brasileiro e suas perspectivas de crescimento.

Palavras-chave: Etanol; Milho; Grão; Biocombustível; Processo produtivo.

ABSTRACT

Brazil is one of the biggest ethanol producers in the world, and unlike the United States of America which produces ethanol from corn, in Brazil ethanol is produced almost entirely from sugarcane. Despite being very consolidated in the country and having high productivity, sugarcane has an extensive off-season, thus leaving the mills in an idle period of production. Corn, on the other hand, has more than one annual harvest in Brazil, and in the last decade, the growth of these crops has been one of the drivers of corn ethanol in the country. In the Central-West Region, mainly in the state of Mato Grosso, the large production volumes combined with the logistical difficulties of storing and transporting the grain led to the implementation of the first corn ethanol plant in Brazil in 2012. Currently, in Brazil there are three types of mills that use corn in their production processes: the Flex mill, where the corn is used in the sugarcane off-season; the Full corn mills, which were designed exclusively for the production of corn ethanol; and the Full Flex mills, where corn and sugarcane are processed in parallel in the same production plant. In recent years, many corn plants have been implemented in the country and the forecast is that for the coming years, the numbers will be even greater. Processing from corn brings great advantages to the Brazilian sugar-energy and agricultural sectors. This is because, in addition to the production of bioethanol helping to meet the high demand for fuels, in the processing of corn ethanol we have important co-products such as DDG and WDG, that can be used to replace soybean meal in animal nutrition. The corn and sugar cane ethanol processes have many similarities, but they also have some differences, such as the additional corn starch hydrolysis steps, the fermentation time, the treatment of the distillery grains, and the operational conditions, which are different in parts of the process. In this context, the present study aims to survey the ethanol production process using corn as a raw material. In addition, analyze the Brazilian scenario and its growth prospects.

Keywords: Ethanol; Corn; Grain; Biofuel; Productive process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma simplificado dos estágios de produção de etanol de milho por SHF	13
Figura 2 - Etapas de Produção de etanol de milho por via seca	15
Figura 3 - Etapas de Produção de etanol de milho por via úmida	16
Figura 4 - Influência do pH e temperatura na atividade de enzima α -amilase termoestável.....	19
Figura 5 - Fluxograma simplificado da produção de etanol de milho por SSF	21
Figura 6 - Rotas metabólicas de fermentação para obtenção de etanol utilizando levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	23
Figura 7- Comparativo da produção de milho de 1ª Safra e 2ª Safra.....	28
Figura 8 - Projeções da demanda de milho, demanda de área para produção de milho, histórico e projeções da produção de etanol de milho no Brasil	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Porcentagem de composição dos integrantes do milho em matéria seca.	17
Tabela 2 - Comparação entre fermentações contínua e batelada alimentada com reciclagem de células para produção de etanol no Brasil	24
Tabela 3 - Principais fontes de receita em uma usina Full milho.....	31
Tabela 4 - Usinas de etanol de milho em operação no Brasil	34
Tabela 5 - Comparativos de produção de etanol de milho e cana-de-açúcar	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(v/v) - volume/ volume

P_i - Fosfato

°GL - °Gay Lussac – teor alcoólico da solução

ADP - Adenosina difosfato

ATP - Adenosina trifosfato

CSL - Corn Steep Liquor - Licor de maceração do milho

DDG - Dried Distillers Grains - Grãos secos de destilaria

DDGs - Dried Distillers Grains with solubles - Grãos secos de destilaria com solúveis

IMEA - Instituto Mato Grossense de Economia Agropecuária

MEG - Monoetilenoglicol

MT - Mato Grosso

SHF - Separate Hydrolysis and Fermentation - Sacarificação e Fermentação

Separadas

SSF - Simultaneous Saccharification and Fermentation - Sacarificação e

fermentação simultânea

UNEM - União Nacional do Etanol de Milho

WDG - Wet Distillers Grains - Grãos úmidos de destilaria

WDGs - Wet Distillers Grains with solubles - Grãos úmidos de destilaria com solúveis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	PROCESSO PRODUTIVO	13
2.1	PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA	13
2.2	MOAGEM DO MILHO - VIA SECA X VIA ÚMIDA	14
2.3	HIDRÓLISE ENZIMÁTICA	17
2.4	FERMENTAÇÃO	21
2.5	DESTILAÇÃO – OBTENÇÃO DE ETANOL E COPRODUTOS	26
3	ETANOL DE MILHO NO BRASIL	28
3.1	COPRODUTOS	30
3.2	MODELOS DE USINAS DE ETANOL DE MILHO	32
3.3	USINAS DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL	32
3.4	MILHO X CANA-DE-AÇÚCAR	34
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a consciência de práticas sustentáveis aumentou significativamente entre governos e indústrias de todo o mundo. Visando a mitigação do efeito estufa, os biocombustíveis surgiram como uma boa alternativa para a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e geração de energia mais sustentável. Dentre os biocombustíveis, destaca-se o etanol, que pode ser obtido através do processamento de diferentes cultivos como cana-de-açúcar, milho, sorgo, mandioca, beterraba (INTARAMAS et al., 2019; SANTOS et al., 2022) e também o etanol de segunda geração, produzido por biomassa lignocelulósica como o bagaço da cana, espiga de milho, palha de cana e palha de milho (ALOKIKA et al., 2020; BATTAGLIA et al., 2020; CUNHA et al., 2020).

O etanol é um combustível amplamente utilizado no Brasil, e a sua importância foi acentuada a partir da década de 1970, com a crise mundial do petróleo e a criação do Proálcool, programa de incentivo fiscal do governo que visou a diminuição da dependência brasileira de combustíveis derivados de petróleo. Com isso houve uma grande expansão do uso do etanol no país e o desenvolvimento de novas tecnologias (BERTELLI, 2005; DA CRUZ; GUERREIRO; RAIHER, 2012; MARCONDES; LIMA, 2002). O setor sucroenergético brasileiro tem grande importância econômica para o país, sendo o Brasil atualmente o segundo maior produtor de etanol no mundo (MOHANTY; SWAIN, 2019), e com predominância de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Já em países como Estados Unidos, Canadá e China, o etanol é produzido quase em sua totalidade a partir do milho (BORTOLETTO; ALCARDE, 2015).

A utilização do milho como matéria-prima na produção de etanol no Brasil é relativamente nova, tendo início em 2012 no estado do Mato Grosso (NEVES et al., 2021). O estado do Mato Grosso é o maior produtor de milho do Brasil, segundo o IMEA (2022), na safra de 2021/22 foram produzidos 43,8 milhões de toneladas, com um incremento de 34,6% em relação à safra anterior, sendo o estado responsável por aproximadamente 39% da produção nacional de milho, que foi de 113,3 milhões de toneladas (CONAB, 2022a).

O grande volume de produção, aliado às dificuldades logísticas e financeiras no escoamento e armazenamento da produção do milho, fez com que os produtores/indústrias buscassem alternativas que agregassem valor à cadeia do cereal de forma local (MILANEZ et al., 2014). Dessa forma, o milho começou a ser

utilizado como matéria-prima para a produção de bioetanol no Brasil, e atualmente vem apresentando crescimentos expressivos. Segundo UNEM (2022a), foram produzidos durante a safra 2021/22 3,43 bilhões de litros de etanol de milho no Brasil, e estima-se que na safra 2022/23 sejam produzidos 4,5 bilhões de litros, passando de 12,5% para 15% da participação na produção total de biocombustíveis do país.

A produção de etanol no Brasil permanecerá sendo majoritariamente proveniente da cana-de-açúcar, uma vez que existem vantagens significativas de produtividade (AZEVEDO, 2018; SILVA; AYARZA, 2020), além de ser um setor já consolidado no cenário energético brasileiro. Sendo assim, o etanol de milho aparece como uma alternativa complementar para o setor sucroenergético, podendo reduzir a ociosidade operacional na entre safra da cana-de-açúcar e converter o excedente da produção de milho em bioetanol, elevando assim a produção nacional do combustível.

No Brasil, o milho pode ser processado por três modelos de usinas: usinas Flex, onde os grãos de milho produzidos ao longo do ano são armazenados em silos, sendo então processados somente durante a entressafra da cana. Usina Full Milho, que utiliza apenas o milho como matéria-prima. E as usinas Flex Full, onde o processamento do milho é realizado em paralelo com a cana-de-açúcar, possibilitando produção durante o ano todo e não somente na entressafra da cana (NEVES et al., 2021).

O processo produtivo de etanol de milho utiliza o amido presente no milho, e em processos fermentativos semelhantes aos realizados na fermentação da cana-de-açúcar, obtêm-se etanol e diferentes coprodutos. São necessárias, no entanto, etapas adicionais de hidrólise na conversão da matéria-prima amilácea em açúcares fermentescíveis, utilizando enzimas como α -amilase, β -amilase e glucoamilase (VAN DER MAAREL et al., 2002). Além do etanol anidro e hidratado, a indústria de etanol de milho produz também alguns coprodutos que agregam valor como os DDG (grãos secos de destilaria), WDG (grãos úmidos de destilaria), DDGs (grãos secos de destilaria com solúveis), WDGs (grãos úmidos de destilaria com solúveis); esses grãos de destilaria são farelos proteicos utilizados como fonte de alimento na criação de animais (MARTINEZ-AMEZCUA et al., 2007).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo do processo produtivo do etanol de milho e caracterizar o cenário brasileiro, realizando um levantamento das usinas implementadas, capacidade produtiva e perspectivas de crescimento.

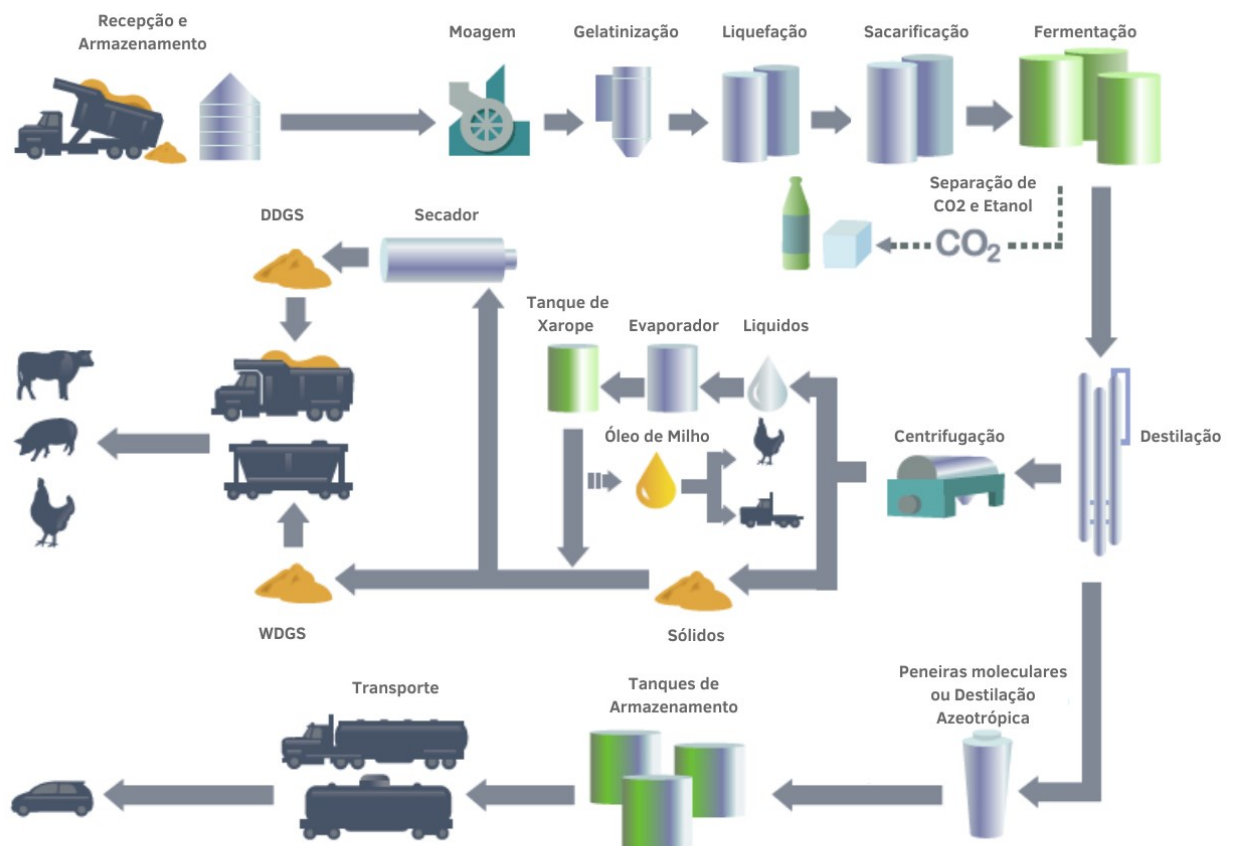
1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo sobre o processo produtivo do etanol de milho: processo preliminar de limpeza da matéria-prima, hidrólise do amido, fermentação, destilação e separação;
- Avaliar a evolução da utilização do milho como matéria prima para produção de etanol no Brasil;
- Comparar as matérias primas utilizadas: milho e cana de açúcar;
- Identificar os coprodutos provenientes do processo.

2 PROCESSO PRODUTIVO

A produção de etanol de milho pode ser descrita basicamente como um processo de cinco estágios principais: pré-tratamento da matéria-prima, hidrólise/sacarificação, fermentação, destilação e separação. Além disso, o beneficiamento do milho nas indústrias pode acontecer através de processos de moagem seca e úmida. Na Figura 1 está apresentado um fluxograma simplificado da produção de etanol de milho que será abordada no presente trabalho.

Figura 1- Fluxograma simplificado dos estágios de produção de etanol de milho por SHF



Source: RFA

Fonte: Adaptado de RFA (2021).

2.1 PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

A colheita do milho é realizada de forma mecânica através de colheitadeiras que separam a espiga do colmo e os grãos de milho da espiga, tendo como resíduo o sabugo e a palha, comumente chamados de palhada, utilizadas como cobertura do solo no campo, ou também como biomassa para geração de energia (ZAMBRZYCKI; DO VALE; DANTAS, 2014). Os grãos coletados são transportados para as plantas de

produção através de caminhões ou linhas ferroviárias. Ao chegar na planta esse milho é pesado e analisado para determinar a qualidade da matéria-prima, bem como avaliar se há presença de contaminantes que possam prejudicar o processo produtivo (CONAB, 2015).

Após as análises, segundo Grippa (2012), além de limpo, o material deve ser seco de forma adequada para que a estabilidade de sua qualidade seja mantida, uma vez que quando armazenados os grãos estarão sujeitos a deteriorações devido a fenômenos físicos, químicos e biológicos. Para serem armazenados, a umidade do milho deve ser aproximadamente 12 a 13% (SENAR, 2018), mas segundo Fonseca (2021) o milho pode ser colhido com aproximadamente 20% de umidade, sendo assim necessários os processos de secagem antes de serem enviados para os silos.

Também é importante salientar que dependendo da temperatura do ar, pode haver diminuição do teor de proteínas e aminoácidos, e também um aumento no grau de gelatinização do amido (MILANE, 2015; VOCA et al., 2009), assim, o controle de temperatura é essencial nessa parte do processo.

No processo de limpeza, são retirados sabugos, folhas, caules e detritos remanescentes, podendo assim os grãos de milho serem armazenados em silos. Essa limpeza deve ser realizada para manutenção da qualidade do substrato, mas também para que não haja problemas no processamento, como aumento de viscosidade e desgaste de equipamentos (RAUSCH, et al., 2019). Antes de seguir para o processo, o milho também passa por grandes ímãs que retiram qualquer objeto metálico que possa estar misturado no milho, evitando assim maiores danos aos moinhos (GRIPPA, 2012).

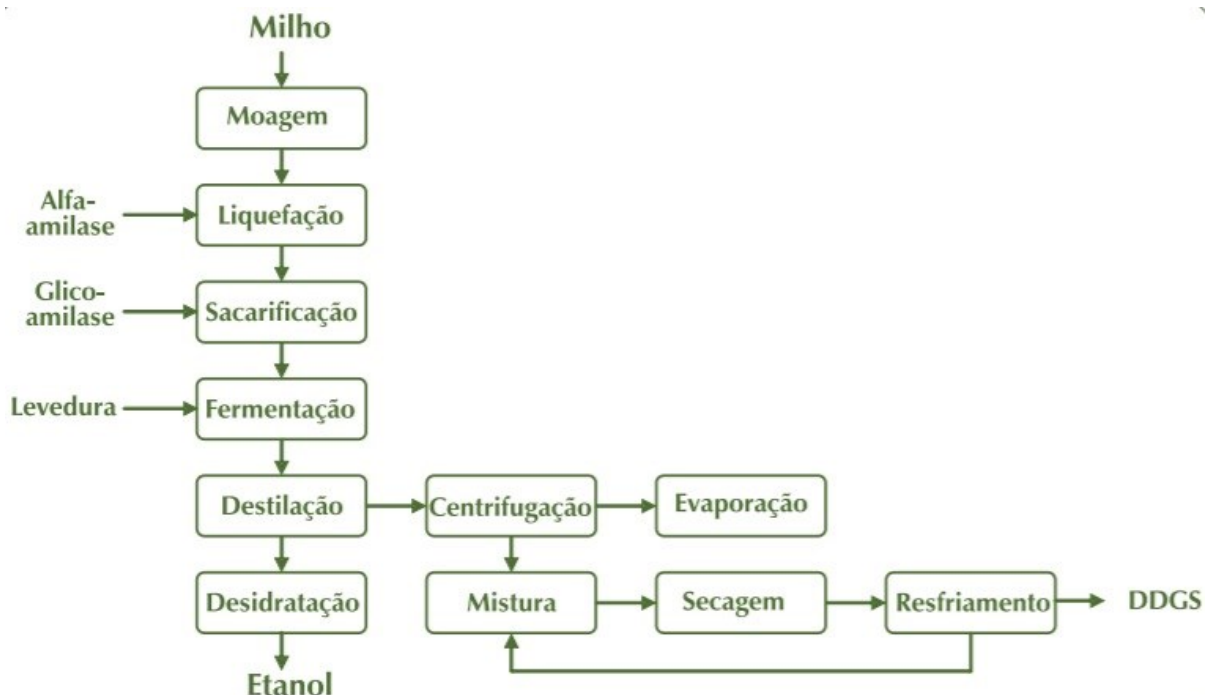
2.2 MOAGEM DO MILHO - VIA SECA X VIA ÚMIDA

Nos moinhos o material proveniente dos silos de estocagem é moído por moinhos do tipo martelo, e transformados em um produto chamado de farinha de milho. Nesse processo é importante salientar a importância de que o tamanho das partículas seja uniforme, uma vez que afeta diretamente a conversão de etanol (GRIPPA, 2012). Segundo Kelsall e Lyons (2003), a finura da moagem pode ser um fator significativo no rendimento final do álcool, podendo apresentar uma diferença entre 5 e 10% no rendimento entre uma farinha grossa e uma farinha fina.

A moagem pode ser realizada de duas formas: moagem seca e moagem úmida. Na moagem via seca, todo o grão é processado, sendo os componentes residuais

separados no final do processo. O processamento é dividido em 5 etapas, moagem, liquefação, sacarificação, fermentação, destilação e separação (MOSIER; KLEIN, 2020). Nesse tipo de moagem, os principais subprodutos obtidos são os DDGs, WDGs e óleo de milho. No processamento via seca, o grão é moído em pó sem adição de soluções aquosas (D'ARCE; SPOTO; CASTELLUCCI, 2019). O fluxograma do processo utilizando moagem seca está representado pela Figura 2.

Figura 2 – Etapas de Produção de etanol de milho por via seca

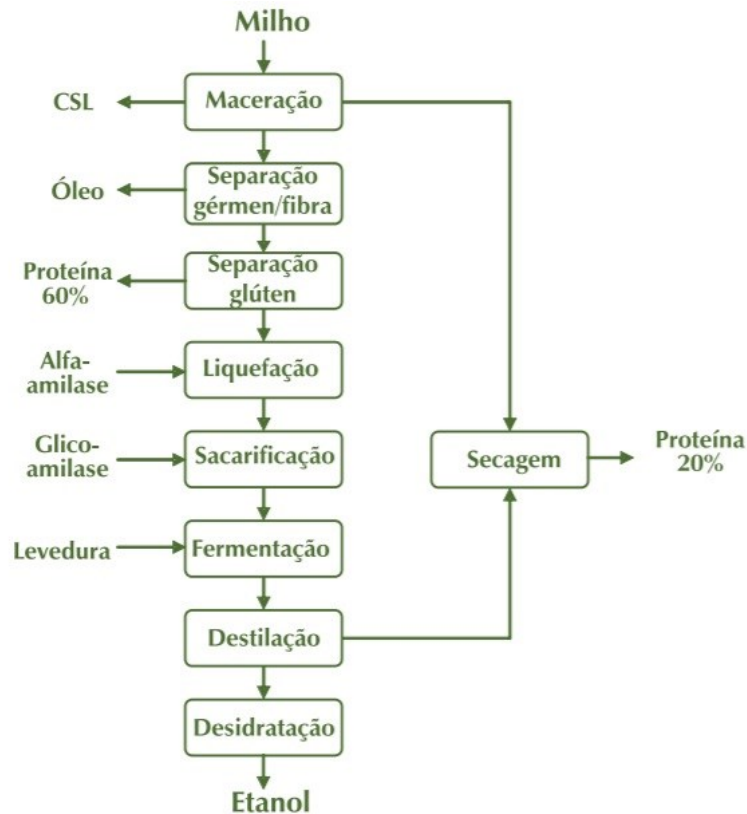


Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Na moagem via úmida, ilustrada pela Figura 3, temos a produção de muitos coprodutos: xarope de milho com alto teor de frutose, ácido cítrico, goma xantana, dextrinas, óleo refinado, fibras, farinha de glúten de milho (alta proteína), CSL (licor de maceração do milho), ração de glúten de milho (baixa proteína) e óleo de milho. (MOSIER; KLEIN, 2020; RAUSCH et al., 2019). O processo por via úmida apresenta como etapa adicional anterior à moagem, a maceração dos grãos, onde uma solução de dióxido de enxofre e de ácido láctico são adicionadas à matéria-prima para promover uma melhor separação do amido e das proteínas do milho. A temperatura de maceração deve ser de aproximadamente 52 °C e o pH baixo (MUSSOLINI, 2009). Essa separação dos componentes do milho permite que eles sejam processados

separadamente, facilitando a produção dos variados coprodutos de alto valor agregado, no entanto, não se tem a produção de grãos de destilaria nesse modelo.

Figura 3 - Etapas de Produção de etanol de milho por via úmida



Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Segundo Saville, Griffin e MacLean (2016), na moagem via úmida, a remoção de sólidos após a etapa de maceração leva a um processo mais simplificado de destilação e consequentemente mais eficiente em termos energéticos. Entretanto, Perez et al. (2003), constataram que esse tipo de processamento demanda investimentos elevados, além de um alto tempo de produção, podendo atingir 48 horas, devido à resistência do milho em absorver água e SO₂. Nesse processo temos também a utilização de um grande volume de água, 1,2 a 1,4 toneladas de água para cada tonelada de milho (JACKSON; SHANDERA JR., 1995).

Atualmente o processo por via seca é mais utilizado devido aos custos operacionais serem inferiores aos de produção por via úmida (BNDES, 2008; CRIPWELL et al., 2020), além da demanda crescente por DDGs, que faz com que o processamento seco seja favorável economicamente para as indústrias. Sendo assim, o presente trabalho será realizado dando ênfase no método de produção por via seca.

2.3 HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

A composição em matéria seca de todos os nutrientes e componentes do milho estão presentes na Tabela 1, sendo possível observar que o milho é composto majoritariamente de amido.

Tabela 1- Porcentagem de composição dos integrantes do milho em matéria seca

Componentes presents no Milho	% Peso
Amido	70-75
Proteína	10
German	4-5
Fibra	3-4
Cinzas	2

Fonte: Adaptado de BNDES e CGEE (2008).

Diferentemente da cana, que possui açúcares fermentáveis como a sacarose (glicose + frutose), os componentes amiláceos precisam passar por um processo de hidrólise onde através da ação de enzimas, o amido é transformado em açúcares fermentáveis possibilitando o processo de fermentação das leveduras (LI; DUAN; WU, 2016; SILVA et al., 2022). Segundo Scipioni (2011), a hidrólise consiste na clivagem do polímero de amido em compostos de cadeia curta como maltose, dextrose e monômeros de glicose. Assim, ao sair do processo de moagem, o amido contido na farinha de milho necessita ser hidrolisado.

Segundo Cripwell et al. (2020) as enzimas usualmente utilizadas no processo de hidrólise são: α -amilases, β -amilases e a glucoamilase. O uso dessas três enzimas pode alcançar uma conversão total do amido, sendo 85% convertidos pelas amilases e o restante pela glucoamilase. A hidrólise é constituída basicamente de três etapas: gelatinização, liquefação e sacarificação (MACHADO; ABREU, 2006; LOPES et al., 2021).

A economia de produção de etanol é significativamente influenciada pelo custo dos seus insumos. Além de caras, as enzimas são extremamente sensíveis e em razão disso, estratégias de recuperação e prolongamento do uso dessas enzimas estão atraindo atenção de muitos pesquisadores. Uma das soluções muito estudadas é a imobilização de enzimas, que consiste na anexação de enzimas a um suporte inerte, facilitando sua recuperação e reutilização. Pesquisas como a de Baptista

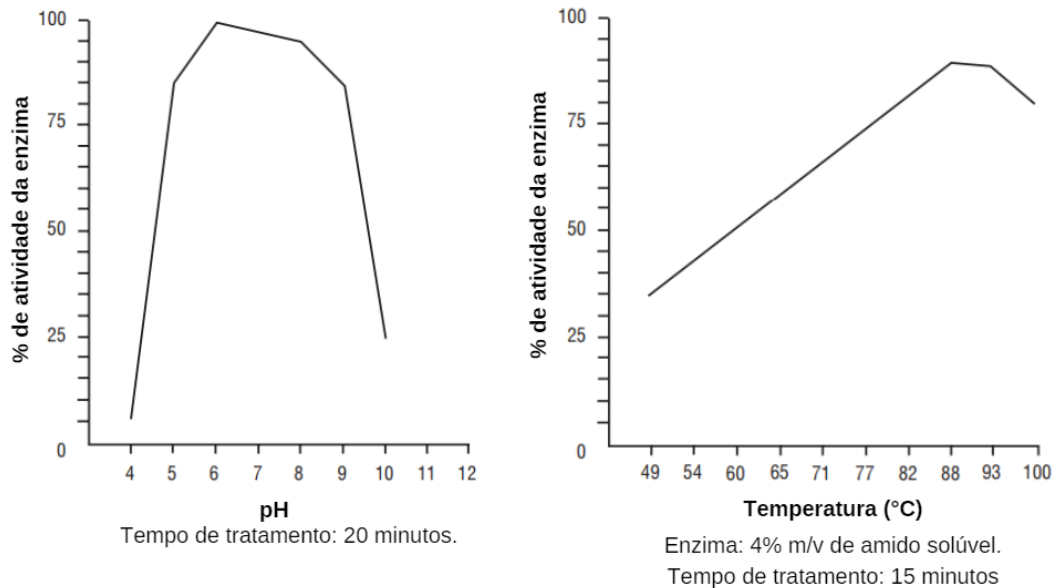
(2013) e Luchiari (2019), obtiveram resultados positivos na imobilização de enzimas para hidrólise do amido de milho.

A primeira etapa de hidrólise é chamada de gelatinização, mas também pode ser considerada como uma pré-hidrólise, pois precede à adição das enzimas. Nessa etapa o farelo de milho proveniente da moagem do grão é misturado com água em excesso e cozinhado até a gelatinização completa dos grânulos, sendo a temperatura de gelatinização do amido de milho de aproximadamente 70°C (SOUZA; ANDRADE, 2001). Entretanto, estudos como o de Xu et al. (2020) mostram que a temperatura pode variar, dependendo do tipo de grão, umidade, e também da porcentagem de amilose presente no amido.

A gelatinização é realizada de modo a separar a amilose e amilopectina presentes no amido, facilitando a ação da enzima α -amilase na etapa de liquefação. Os grânulos de amido são insolúveis em água fria, mas quando a mistura da farinha de amido com água é cozida, os grânulos de amido começam a adsorver a água e inchar. Segundo Hoover (2001), isso acontece devido à quebra das pontes de hidrogênio presentes entre as moléculas de amilose e amilopectina, permitindo assim a entrada de água dentro dos grânulos. A estrutura granular do amido é então rompida e a viscosidade é aumentada, formando a pasta de amido (KELSALL; LYONS, 2003; QUINTERO et al., 2008).

Nessa etapa de cozimento e gelatinização o pH é ajustado adicionando-se ácido sulfúrico ou ácido clorídrico. Isso é necessário para que a pasta de amido tenha um ambiente propício para ação da α -amilase na etapa seguinte de liquefação, sendo o pH ótimo da α -amilase entre 5,0 e 6,0. (SIVARAMAKRISHNAN et al., 2007). Como demonstram os estudos de Gonçalves (2006), Carvalho et al. (2007) e Spier (2005), em que foram obtidas temperaturas ótimas entre 50°C a 95 °C, a temperatura ótima da enzima α -amilase pode variar de acordo com a origem da enzima. Como as temperaturas de hidrólise de amido de milho são elevadas, é necessária a utilização de enzimas termoestáveis que suportam temperaturas superiores a 90 °C. Na Figura 4 está apresentado o efeito do pH e temperatura em uma enzima α -amilase termoestável.

Figura 4 - Influência do pH e temperatura na atividade de enzima α -amilase termoestável



Fonte: Adaptado de Kelsall e Lyons (2003).

Posteriormente à gelatinização, inicia-se a etapa de liquefação. Essa etapa consiste na adição da enzima α -amilase à pasta gelatinizada de amido de milho, transformando as moléculas de amilose e amilopectina em dextrinas e oligossacarídeos (BOTHAST; SCHLICHER, 2005). Segundo Kelsall e Lyons (2003) a dosagem da enzima é tipicamente entre 0,04% e 0,08% da massa da pasta a ser liquefeita, sendo a etapa de liquefação realizada sob agitação durante no mínimo 30 a 60 minutos. Esse tempo de residência pode ser ainda maior, aproximadamente 1,5 a 2 horas, uma vez que o tempo de reações catalisadas por enzimas é diretamente proporcional à concentração de enzimas utilizadas. Como as enzimas possuem um alto custo, é comum que indústrias aumentem o tempo de residência da etapa de liquefação para que as reações sejam realizadas com a dosagem mínima de enzimas. A etapa de liquefação diminui a viscosidade da solução através do uso de enzimas, agitação e temperaturas superiores a 95°C, permitindo assim que a etapa de sacarificação possa ocorrer de forma facilitada (BOTT et al., 2018).

A última etapa de hidrólise do amido é chamada sacarificação. A solução liquefeita contendo dextrinas e oligossacarídeos é resfriada e seu pH é ajustado para que a sacarificação catalisada pela enzima glucoamilase seja realizada. Após a liquefação, a pasta de milho passa a se chamar “massa de milho” (MOSIER; KLEIN, 2020).

A enzima glucoamilase assim como a α -amilase possui pH e temperatura ótimas de atividade, podendo também haver variações conforme o tipo ou origem da enzima. No caso da glucoamilase, a temperatura e pH precisam estar em faixas menores que as citadas para a α -amilase, sendo a temperatura ótima aproximadamente 60 a 65°C e o pH entre 4,0 e 5,0 para a atividade da glucoamilase. Entretanto, como deseja-se mitigar a presença de contaminações nessa etapa, usualmente são utilizadas enzimas termoestáveis que suportam temperaturas superiores. Sendo assim, glucoamilases com temperatura ótima de 75 °C são comumente utilizadas (KELSALL; LYONS, 2003; PAVEZZI, 2006).

Na sacarificação as dextrinas são transformadas em moléculas de glicose, possibilitando assim o processo de fermentação e obtenção de etanol pelas leveduras. Esse processo geralmente leva entre 45 a 90 minutos, podendo chegar em alguns casos a até 6 horas, e a quantidade de enzima adicionada é de 0,06-0,08% da massa a ser sacarificada. Após o processo de hidrólise, a massa de milho passa a se chamar mosto (KELSALL; LYONS, 2003).

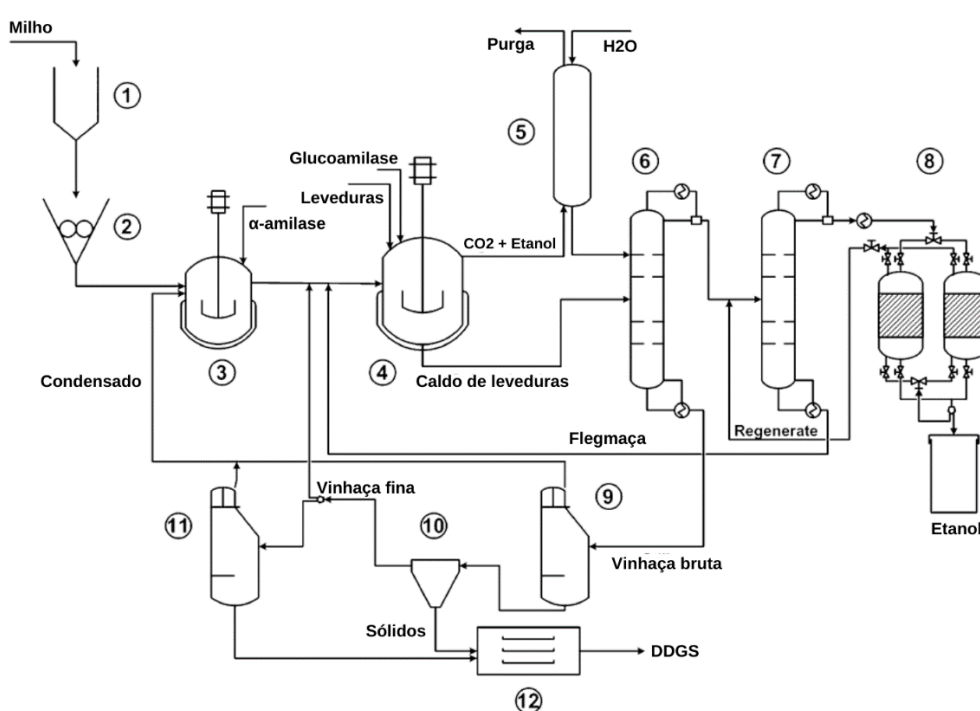
Quando o processo é realizado da forma como foi descrita, onde a etapa de sacarificação é realizada previamente a fermentação, temos um modelo chamado de hidrólise enzimática de sacarificação e fermentação separada (SHF). Porém, temos também um outro modelo que muitas indústrias vêm utilizando, o SSF, onde a etapa de sacarificação e fermentação são realizadas de forma simultânea (VÁSQUEZ et al., 2007).

No modelo SSF, a sacarificação acontece juntamente com a fermentação nas dornas ou biorreatores de fermentação. Com isso, a glicose formada pela enzima glucoamilase é imediatamente consumida e convertida em etanol, podendo assim reduzir a inibição gerada pela grande quantidade de substrato (glicose) (POWER, 2003). O que não acontece no SHF, onde toda a glicose produzida durante a sacarificação é transferida para os biorreatores, estando disponíveis para o consumo das leveduras assim que são adicionadas ao mosto.

Segundo Sanches e Cardona (2008), o processo SSF apresenta índices mais atrativos que o SHF, pois o rendimento da produção é maior e o consumo energético é menor. Estudos como o de Camporezi e Dias (2021), realizados no Brasil, também demonstram que o processo se SSF apresenta resultados positivos quanto ao rendimento de produção do etanol de milho. Além disso, pesquisas demonstram que no SSF o tempo de processo é menor, o que pode ser vantajoso, uma vez que o tempo

para hidrólise e fermentação da indústria de etanol de milho é significativamente alto se comparados com a indústria de cana-de-açúcar (SANTOS; MAIOR; GOUVEIA, 2010). Entretanto, como as enzimas utilizadas possuem um alto custo para a indústria de etanol de milho, a possibilidade de operação em condições ideais para cada enzima é um dos grandes atrativos para o processo SHF. Na Figura 5, temos ilustrado o fluxograma simplificado da produção de etanol de milho utilizando a configuração SSF.

Figura 5 - Fluxograma simplificado da produção de etanol de milho por SSF



1. Tanque de lavagem, 2. Moinho, 3. Tanque de liquefação, 4. Biorreator SSF, 5. Coluna de CO₂ (recuperação de etanol), 6. Coluna de destilação, 7. Coluna de retificação, 8. Peneiras moleculares, 9. Evaporador, 10. Centrifuga, 11. Evaporador, 12. Secador. Fonte: Adaptado de Quintero, 2008.

2.4 FERMENTAÇÃO

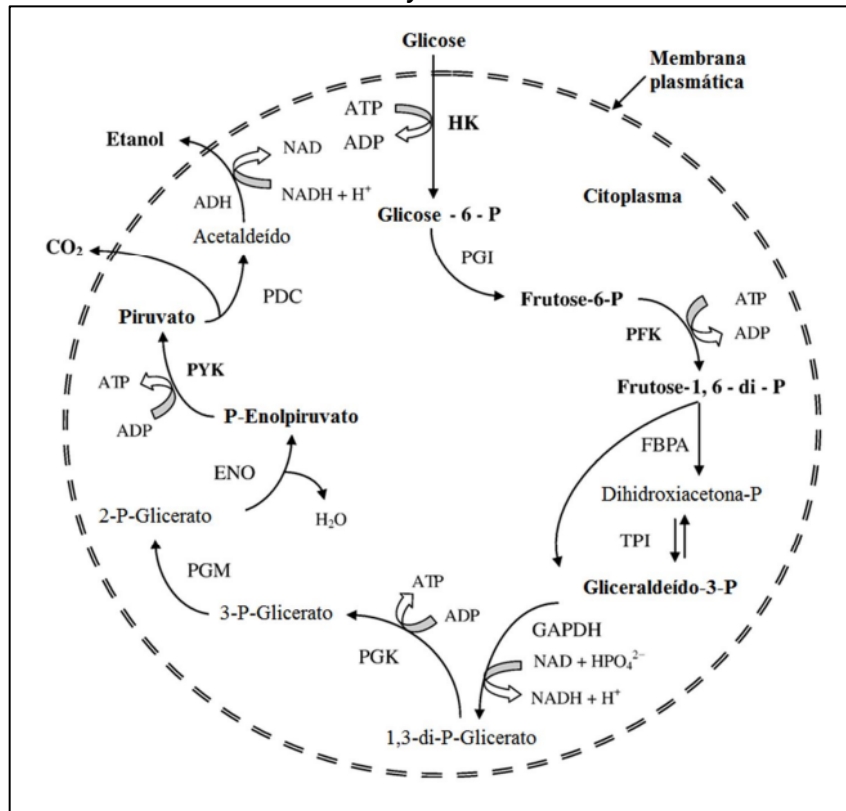
O processo fermentativo consiste em um processo bioquímico anaeróbio, onde o etanol é produzido através do consumo de açúcares simples durante o processo metabólico de leveduras. A levedura mais utilizada nos processos fermentativos é a *Saccharomyces cerevisiae* (PARAPOULI et al., 2020). Segundo Vasconcelos (2010), essas leveduras precisam apresentar algumas características importantes para uma produção eficiente de etanol, como: resistência à acidez e temperaturas elevadas, elevada conversão de açúcares em etanol, estabilidade genética, baixa produção de

glicerol, tolerância a altas concentrações de substrato e de etanol de modo a evitar efeitos inibitórios.

A seleção de leveduras aumenta os rendimentos da produção de etanol na indústria, sendo assim, após anos de pesquisas foram desenvolvidas cepas de leveduras que são amplamente utilizadas nas unidades sucroenergéticas brasileiras, dentre elas estão as leveduras CAT-1, PE-2, BG-1 e FT-858 (BASSO L.; BASSO T.; ROCHA, 2011; LNF, 2013). Além da qualidade da levedura, outros fatores afetam o processo fermentativo, dentre estes se destacam-se: pH, temperatura, acidez, presença de microrganismos contaminantes, presença de sulfito, concentração de açúcares do meio, concentração de etanol e disponibilidade de nutrientes (MELO, 2006; SOUSA; MONTEIRO, 2012).

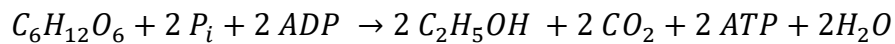
De acordo com Bai, Anderson e Moo-Young (2008), a principal via metabólica envolvida na produção do etanol em leveduras é a via glicolítica (Embden-Meyerhof), onde uma sequência de reações realizadas no interior das células e catalisadas por enzimas específicas, convertem a glicose em piruvato. Em seguida, o piruvato é descarboxilado pela enzima piruvato descarboxilase formando acetaldeído, que é reduzido a etanol pela enzima álcool desidrogenase. As reações de transformação de glicose em etanol e CO₂ através da via glicolítica estão representadas na Figura 6.

Figura 6 - Rotas metabólicas de fermentação para obtenção de etanol utilizando levedura *Saccharomyces cerevisiae*



Abreviaturas: HK: enzima hexoquinase; PGI: fosfoglucoisomerase; PFK: fosfofrutoquinase; FBPA: frutose bifosfato aldolase; TPI: triose fosfato isomerase; GAPDH: gliceraldeído-3-fosfato desidrogenase; PGK: fosfoglicerato quinase; PGM: fosfoglicomutase; ENO: enolase; PYK: piruvato quinase; PDC: piruvato descarboxilase; ADH: álcool desidrogenase. Fonte: Adaptado de Bai, Anderson e Moo-Young (2008).

Segundo Russell (2003), podemos também representar o processo fermentativo de uma maneira mais simplificada, através da equação de Gay-Lussac:



Essa equação, nomeada em homenagem ao cientista francês Gay-Lussac, mostra que a glicose produz partes iguais de etanol e dióxido de carbono, além de produzir energia. A equação consiste basicamente em uma molécula de glicose e duas de fosfato e de ADP que são transformadas em duas moléculas de etanol, dióxido de carbono, ATP e água, sendo ADP e ATP compostos orgânicos responsáveis pelo fluxo de energia das células vivas. Como é uma reação simplificada, ela não mostra que parte do açúcar é usado no crescimento da levedura e que existem outros metabolitos produzidos por fermentação secundária, como glicerol, acetoina, acetaldeído, ácidos orgânicos, álcoois superiores, formação de

biomassa, os quais são alguns exemplos de produtos secundários indesejados que reduzem o rendimento prático da fermentação (MUTTON, 2008; RUSSELL, 2003).

Estima-se que em operações industriais, deve-se almejar conversões de aproximadamente 90% do rendimento teórico, sendo os 10% de afastamento do valor teórico devido a fatores como a produção dos metabólitos, condições de contaminação, possíveis inibições no processo fermentativo (CANHA, 2009; WALKER G.; WALKER R., 2018). Diversos estudos visam aumentar esses percentuais de rendimento, como exemplo o realizado por Ferreira et al. (2021) que demonstrou que a adição de suplementos nutricionais à base de nitrogênio e fósforo, melhoram as condições de fermentação alcoólica nas usinas de etanol de milho.

Os processos fermentativos podem ocorrer de forma contínua ou descontínua (batelada). Na maioria das usinas sucroenergéticas brasileiras, o processo de fermentação ocorre em bateladas, sendo apenas os processos *upstream* (moagem e hidrólise) e *downstream* (destilação e recuperação) realizados continuamente. Desse modo, as instalações das usinas possuem geralmente uma série de biorreatores que se alternam durante a produção (MOSIER; KLEIN 2020). O motivo pela preferência por processos em batelada está diretamente relacionado com possíveis contaminações microbiológicas que podem reduzir significativamente o rendimento da produção (CNPEM, 2017). Na Tabela 2 pode-se observar a comparação entre as fermentações contínua e descontínua.

Tabela 2 - Comparação entre fermentações contínua e batelada alimentada com reciclagem de células para produção de etanol no Brasil

Características	Unidade de medida	Contínua	Batelada alimentada
Rendimento de fermentação	%	87,0-89,5	88,9-90,5
Contaminação bacteriana no vinho	Bastonetes bacterianos/ mL	3,8-3,9 x 10 ⁷	2,0-3,9 x 10 ⁷
Consumo de ácido sulfúrico	g/L de etanol	8-14	6-7
Consumo de antibióticos	mg/L de etanol	5,7-13,0	3,8-8,0

Fonte: Adaptado de Lopes et al. (2016).

Em usinas de cana-de-açúcar, no controle desses contaminantes é muito comum a utilização de diferentes tipos de antibióticos. Porém, em usinas de etanol de milho o mais recomendado na literatura é o uso de antibióticos como a penicilina e virginiamicina (DAVE; KELSALL; LYONS, 2003). De acordo com a PROZYN BIOSOLUTIONS (2021), o cuidado com a escolha do antibiótico é devido à possibilidade de contaminação por antibióticos dos DDSs e WDGs, que são utilizados na ração animal e importantes coprodutos da produção de etanol de milho. A empresa ainda cita a possibilidade de utilização de antimicrobianos naturais, como de extratos derivados do lúpulo como alternativa aos antibióticos.

Além dos antibióticos, o controle de contaminações nas indústrias é realizado através de um tratamento ácido, com a correção do pH do meio através da adição de ácido sulfúrico (MASSON, 2013). As leveduras são acidófilas e em mostos industriais, os valores de pH geralmente possuem uma faixa de pH de 4,5 a 5,5 (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001). Com relação à temperatura ótima para as leveduras, temperaturas da ordem de 26-35°C são favoráveis ao processamento de etanol, sendo 32°C a temperatura usual de muitas plantas brasileiras. É importante também salientar que a temperatura ótima pode variar dependendo da cepa de *Saccharomyces cerevisiae* utilizada no processo (CASTRO et al., 2015). Visto isso, é na etapa de fermentação que as leveduras são adicionadas às dornas de fermentação, onde está presente o mosto contendo açúcares fermentescíveis provenientes das etapas anteriores de hidrólise do amido.

No Brasil, o sistema tradicional de produção de etanol é o sistema Melle-Boinot, que é um processo de batelada alimentada onde as leveduras são centrifugadas e tratadas ao final da fermentação, podendo ser reutilizadas em novos lotes de fermentação (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011). Entretanto, no processo de produção de etanol de milho o fermento não pode ser separado do vinho fermentado, devido à natureza física do mosto de milho. Assim, após a fermentação todo o vinho é enviado para a destilação, não havendo a separação das leveduras (BELLUCO; ALCARDE, 2008). Com isso, existe um grande custo na adição de novas leveduras a cada processo fermentativo. De acordo com Andrietta (2019) e Godoy (2019), é possível utilizar as células de leveduras excedentes do processo de etanol de cana, se estiverem em condições satisfatórias, no processo de produção de etanol de milho, aumentando assim a integração entre as usinas de etanol e cana. Essa prática pode reduzir os custos de produção nas indústrias do tipo Flex e Flex-Full.

Os tempos de fermentação na indústria de milho são muito superiores ao de cana-de-açúcar. Enquanto a fermentação do mosto da cana demora aproximadamente 10 a 12 horas, nas usinas de milho esse tempo de fermentação é de 38 a 45 horas (SOBRINHO, 2012). Podendo esse tempo ser ainda superior, como demonstra Secches et al. (2022), em uma pesquisa realizada sobre leveduras industriais brasileiras, onde apresentaram concentração máxima de etanol após 72 horas de fermentação. Além disso, na condição de altos sólidos, o tempo foi ainda maior, 96 horas para concentração máxima de etanol.

2.5 DESTILAÇÃO – OBTENÇÃO DE ETANOL E COPRODUTOS

Após sair do processo de fermentação, o mosto passa a se chamar vinho fermentado e é encaminhado para o processo de destilação. A destilação é bastante similar a realizada em processos à base de cana-de-açúcar, porém a quantidade de sólidos no vinho é superior. O etanol encontra-se homogeneamente misturado ao vinho fermentado, logo é necessário realizar um processo de separação através de colunas de destilação fracionada. O processo de destilação consiste basicamente em um processo de separação onde o vinho é aquecido e levando em conta os diferentes pontos de ebulição da mistura, o componente de interesse é separado.

De acordo com Lopes et al. (2016), a concentração de etanol no vinho proveniente do processamento do milho é de 12-18% (v/v), sendo assim superior à de processos convencionais de cana-de-açúcar 7-12% (v/v). Na coluna de destilação esse etanol presente no vinho é destilado, saindo no topo da coluna hidratado com um pouco de água que também foi volatilizada. Essa mistura de vapores de etanol e água (45 a 50°GL), chamada flegma, é enviada para coluna de retificação, cujo objetivo é desidratar a mistura de etanol e água, obtendo assim etanol hidratado com teor alcoólico de 96%. A flegmaça, produto de fundo da coluna de retificação, pode ser recirculada no processo (CHIEPPE JUNIOR, 2012).

O restante dos componentes da mistura da primeira coluna, formam o produto da base da coluna, denominado vinhaça bruta. No processamento do etanol de milho, essa vinhaça possui alta quantidade de sólidos em suspensão. Com isso, a vinhaça bruta passa por um processo de centrifugação onde são separados a água residual de destilação (vinhaça fina) e os sólidos (torta úmida ou grãos de destilaria). A vinhaça fina é evaporada em evaporadores sendo concentrada em xarope de milho, de onde parte do xarope é extraído o óleo de milho (MOSIER; KLEIN, 2020).

O xarope de milho é misturado com a torta úmida, podendo ser retirado nessa etapa do processo um dos coprodutos, o WDGs com umidade de aproximadamente 65%. Como o teor de umidade é elevado, ele precisa ser consumido mais rapidamente de modo a evitar a degradação dos nutrientes e aparecimento de mofos. Sendo assim, o WDGs é normalmente comercializado para produtores rurais próximos às instalações da usina (BOTHAST; SCHLICHER, 2005; MALISZEWSKI, 2021).

Essa torta úmida combinada com xarope de milho também dá origem a um importante coproduto da indústria, o DDGs. Assim como o WDGs ele é utilizado na nutrição animal devido ao seu alto valor proteico, entretanto para ser produzido esse coproduto necessita passar por um processo de secagem, onde o produto final será comercializado com 10 a 12% de umidade. Por ter um valor de umidade inferior, ele pode ser mais facilmente armazenado e transportado, sendo assim uma opção mais viável na produção de grãos de destilaria da indústria do etanol de milho (GRIPPA, 2012; MALISZEWSKI, 2021).

O etanol, produto principal do processo, pode ser comercializado de duas formas. A primeira é o etanol hidratado proveniente da coluna de retificação com composição de 96°GL. Outra forma é a produção do etanol anidro, com no mínimo 99,6% de graduação alcoólica. O etanol e a água formam uma mistura azeotrópica que dificulta a separação total por processos de destilação comuns. Com isso, são necessárias outras técnicas para a desidratação desse etanol hidratado obtido na coluna de retificação. Uma das opções muito utilizadas no Brasil é a destilação azeotrópica. Na destilação azeotrópica é introduzido um terceiro componente ao sistema, usualmente utilizando o cicloexano como solução arrastadora. Esse agente arrastador forma um azeótropo com ponto de ebulição mais baixo, permitindo com que a água seja removida (MACHADO; ABREU, 2006).

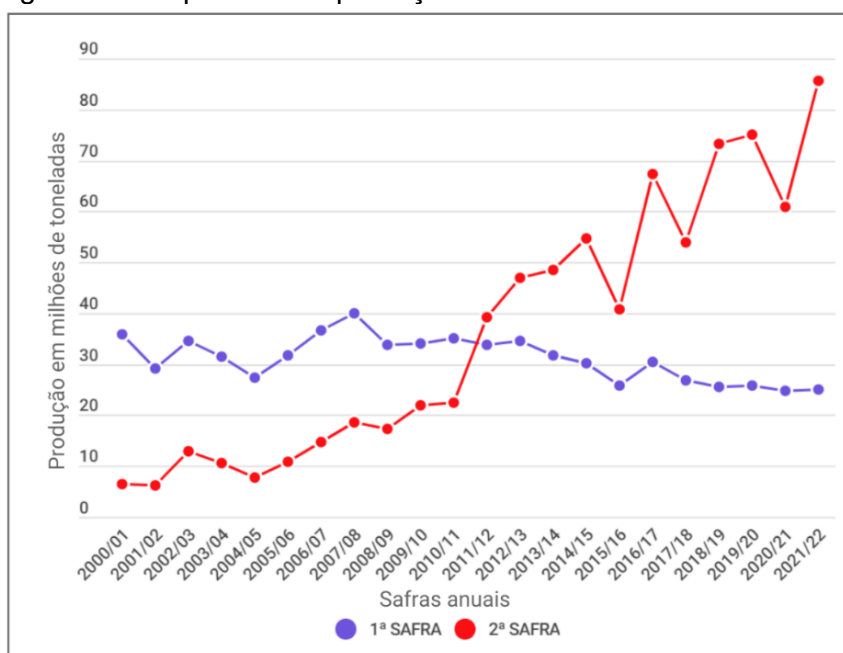
Outra opção na obtenção de etanol anidro é o uso de peneiras moleculares, processo muito utilizado nos EUA. Esse processo proporciona um menor consumo energético que a destilação azeotrópica, mas exige um alto investimento inicial. O processo consiste na utilização de peneiras preenchidas com zeólitas (material microporoso com alta capacidade de adsorção de água). Após a adsorção de água e obtenção do etanol anidro, as zeólitas passam por um processo de regeneração onde a água é removida de seus poros (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011). Além das duas técnicas já citadas, temos também a destilação extrativa, onde monoetilenoglicol (MEG) é utilizado como agente de separação. Esse tipo de destilação é semelhante à

destilação azeotrópica, porém nesse método o MEG, que é alimentado no topo da coluna, arrasta a água para o fundo da coluna. Os vapores de etanol saem pelo topo da coluna, sendo posteriormente condensado e armazenado em tanques (SANTOS et al., 2021).

3 ETANOL DE MILHO NO BRASIL

O milho é a segunda maior cultura de importância na produção agrícola do Brasil, sendo na safra 2021/22 produzidas 113,3 milhões de toneladas do grão, ficando atrás apenas da soja que lidera a produção de grãos no país (CONAB, 2022a). A produção de milho no Brasil é realizada geralmente em duas safras: a primeira safra (verão), plantada entre setembro e dezembro e colhida entre fevereiro e junho, e a segunda safra (inverno), comumente chamada de “safrinha”, plantada entre janeiro e abril e colhida entre junho e agosto (STONEX, 2022). Décadas atrás, a produtividade da segunda safra era inferior à de primeira safra, o que motivou o nome de “safrinha”, porém nos últimos anos sua produtividade cresceu expressivamente como demonstrado pela Figura 7, se tornando a safra com maior volume de produção desde a safra 2011/2012.

Figura 7- Comparativo da produção de milho de 1ª Safra e 2ª Safra



Fonte: Elaboração própria a partir de dados obtidos em CONAB (2022b).

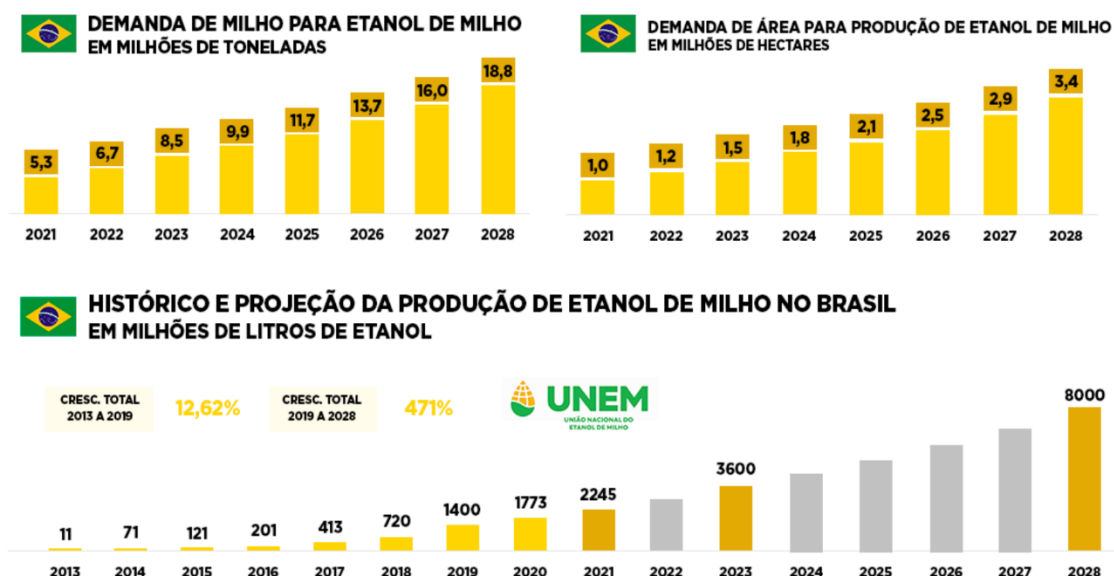
Além das duas safras de milho já consolidadas no Brasil, a CONAB (2022b), recentemente passou a categorizar uma terceira safra, que é plantada entre abril e maio e sua colheita realizada entre outubro e dezembro. Essa terceira safra ainda apresenta valores pouco expressivos se comparada com as principais safras do milho, mas já demonstra possibilidades de crescimento. Diferentemente da maior parte da produção brasileira que acontece nas regiões centro-oeste e sul do país, a terceira safra é realizada na região nordeste, principalmente nos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, e na região norte, no estado de Roraima (COLUSSI; SCHNITKEY, 2021).

Na última década, as super safras de milho estão aumentando as exportações brasileiras e gerando grandes lucros para o país. Entretanto, como o maior volume das safras de milho está concentrado na Região Centro-Oeste do país, e os principais portos estão a milhares de quilômetros da região, os produtores encontraram uma forma de agregar valor localmente ao milho, mitigando o custo de transporte e armazenamento (LOPES; SANTOS; BATISTOTE, 2022). Com isso iniciou-se a produção de etanol de milho no Brasil, primeiramente no estado do Mato Grosso e atualmente em outros estados como Goiás, Paraná e São Paulo.

A demanda de milho para produção de etanol aumentou 309% entre as safras 2014/15 e 2017/18, com isso o excedente de produção pode ser utilizado para gerar receita para as indústrias e produtores rurais, mas também gerou um incentivo para a produção do cereal no país (NEVES et al., 2021). “Segundo o presidente da UNEM, nos últimos cinco anos, a área de milho segunda safra cresceu cerca de 50% em Mato Grosso e parte disso se deve à expansão das usinas do biocombustível” (PORTAL DO AGRONEGÓCIO, 2022).

O etanol de milho está a cada ano que passa mais consolidado no cenário sucoenergético brasileiro e segundo a UNEM citada por UDOP (2021), estima-se que até 2028, a produção de etanol de milho aumentará para 8 bilhões de litros, o que representará 19% da produção total de etanol do Brasil. Essas projeções realizadas estão demonstradas pelos gráficos da Figura 8.

Figura 8 - Projeções da demanda de milho, demanda de área para produção de milho, histórico e projeções da produção de etanol de milho no Brasil



Fonte: Adaptado de Markestrat com base em UNEM, CONAB e usinas de etanol de milho (2021).

3.1 COPRODUTOS

Além da produção de etanol hidratado e anidro, a produção de etanol a partir do milho possibilita a produção de coprodutos agroindustriais que podem ser amplamente utilizados na nutrição animal, fornecendo fontes de proteína para bovinos, aves e suínos. Os principais coprodutos da indústria são os DDG (Dried Distillers Grains – Grãos Secos de Destilaria), WDG (Wet Distillers Grains – Grãos Úmidos de Destilaria), DDGS (Distillers Grains with solubles – Grãos Secos de Destilaria com Solúveis), WDGS (Wet Distillers Grains with solubles – Grãos Úmidos de Destilaria com Solúveis) e óleo de milho. A diferença entre os grãos de destilaria e os grãos de destilaria com solúveis é a incorporação do xarope de milho em seu processamento.

Segundo Duarte, Mattoso e Garcia (2021), cerca de 70% da produção mundial de milho é destinada à alimentação animal, sendo que no Brasil esse valor varia entre 60 e 80%. Isso evidencia a importância dos grãos de destilaria como coprodutos da indústria de etanol de milho, sendo assim uma potencial fonte de receita para a cadeia produtiva. O DDG é uma fonte competitiva de proteína, de acordo com dados de cotação de mercado realizados pela SCOT CONSULTORIA (2022), em dezembro de

2022 o preço médio da tonelada de DDG foi de R\$ 1.541,22, enquanto o de farelo de soja R\$2.540,56. O preço é um atrativo para os agropecuaristas brasileiros e com o crescimento das indústrias de etanol de milho a tendência é que a demanda aumente e esse coproduto se torne cada vez mais relevante no cenário brasileiro de nutrição animal. Além disso, de acordo com a UNEM (2022b), as exportações do DDGS estão em pleno crescimento. Estima-se que em 2022 foram exportados para um total de dez países, cerca de 400 mil toneladas do coproduto, e em 2023 o volume será ainda maior.

Segundo dados estimados pela SCOT CONSULTORIA (2022), na safra 2021/22 foram produzidas 3,1 milhões de toneladas de DDG e WDG, e para a próxima safra, 2022/23 a produção deverá atingir 3,5 milhões de toneladas. De acordo com Neves et al. (2021), a partir de 1000 toneladas de milho podem ser processados aproximadamente 312 toneladas de DDGs e 12,5 toneladas de óleo de milho. Na Tabela 3, onde são mostrados valores aproximados das principais receitas de uma usina Full milho, é possível visualizar que o DDGS contribui com 13% da receita total, demonstrando assim a importância desse coproduto para a indústria.

Tabela 3 - Principais fontes de receita em uma usina Full milho

Produtos e coprodutos	Receita (%)
Etanol de milho	83%
Grãos de destilaria	13%
Óleo de milho	2%
Energia	1%
Outros	1%

Fonte: Adaptado de Neves et al. (2021).

O óleo de milho, outro importante coproduto, é geralmente comercializado para produção de biodiesel, fabricação de tintas e até mesmo como aditivo alimentar para aves e bovinos (SÃO MARTINHO, c2018), e o WDGS, como já citado, devido a sua

maior perecibilidade é produzido em menores quantidades e comercializado com produtores próximos à planta produtiva.

3.2 MODELOS DE USINAS DE ETANOL DE MILHO

No Brasil existem três modelos de usinas de etanol de milho, a usina Full milho, onde a planta é dedicada exclusivamente para produção de etanol de milho, as usinas Flex, que operam durante a entressafra da cana e as usinas Flex Full (ou total Flex) onde em uma mesma planta produtiva etanol de milho e de cana-de-açúcar são produzidos de forma paralela e integrada (NEVES et al., 2021).

O primeiro modelo a ser implementado no Brasil foi o modelo Flex, em 2012 pela Usimat na cidade de Campos Júlio em Mato Grosso. A Usimat adaptou sua planta produtiva de cana-de-açúcar, passando a operar 11 meses por ano, sendo durante 6 meses abastecida por cana-de-açúcar e os outros 5 meses com milho (PATRONI; SILVESTRE, 2012). Com a possibilidade de um maior volume de etanol processado e conseqüentemente maior rentabilidade do processo, vários estudos como o de Milanez et al. (2014) e Donke et al. (2016), foram realizados de modo a avaliar a viabilidade do modelo Flex de produção no Brasil. Além do aumento da receita, o que se destaca nesse modelo de usina é o investimento inicial relativamente pequeno quando comparados com suas vantagens econômicas. Como grande parte dos equipamentos das usinas de cana podem ser utilizados para o processamento do milho, o investimento para a adaptação ao modelo Flex não é muito grande se comparado com a implementação de uma usina Full milho (SOBRINHO, 2012).

Um grande desafio para a indústria do etanol de milho é a viabilidade de biomassa para geração de vapor e energia. O sabugo do milho e a palha possuem baixo poder calorífico, logo as usinas do tipo Full milho necessitam adquirir cavaco de eucalipto para utilização em suas caldeiras. Custo adicional que não é necessário em usinas do tipo Flex e Flex Full, uma vez que a integração com a cana-de-açúcar possibilita a utilização do bagaço da cana nos processos de etanol de milho.

3.3 USINAS DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL

Como foi citado, a primeira unidade de processamento de milho na produção de etanol foi implementada em 2012 pela Usimat. Anos depois, em 2017, foi inaugurada pela FS Bioenergia a primeira usina de produção de etanol exclusiva a partir do milho (Full Milho) no município de Lucas do Rio Verde-MT. Em sua

implementação a usina tinha capacidade de produção anual de 280 milhões de litros de etanol e 250 mil toneladas de DDGs, e na safra 2021/22, a empresa produziu 1,4 bilhões de litros de etanol e 1,25 milhões de toneladas dos grãos de destilaria (FS, 2022). Em 2020 a empresa expandiu suas operações para cidade de Sorriso-MT e em dezembro de 2021, iniciou-se as obras para uma nova usina em Primavera do Leste-MT. Os números produtivos associados com a construção de novas unidades produtivas, demonstram que a FS obteve bons resultados com produção de etanol de milho no país, sendo hoje uma das maiores referências do setor.

Outro grupo que vem apresentando crescimento no país é a Inpasa, que construiu em 2007 no Paraguai, a primeira usina de etanol de milho da América Latina e expandiu seus negócios para o Brasil em 2019, inaugurando sua unidade na cidade de Sinop-MT. Nos anos seguintes a Inpasa inaugurou mais duas usinas de milho, uma em 2020 na cidade de Nova Mutum-MT, e a mais recente inaugurada no final do ano de 2022 na cidade de Dourados-MS (INPASA, c2023; NOVACANA, 2022a).

Segundo a ANP (2023), no Brasil existem 18 usinas de etanol de milho autorizadas para realizarem produção de etanol de milho. Além das usinas em operação, 9 usinas de etanol de milho estão em fase de construção, 4 em fase de ampliação de capacidade produtiva e 3 usinas de cana-de-açúcar em fase de implementação do modelo Flex. A Empresa de Pesquisa Energética (2022) projeta que até 2031, o Brasil terá 40 novas usinas de etanol de milho. Na Tabela 4 estão listadas as usinas em operação no Brasil.

Tabela 4 - Usinas de etanol de milho em operação no Brasil

Empresa	Município	UF
FS	Lucas do Rio Verde	MT
FS	Sorriso	MT
Inpasa	Sinop	MT
Inpasa	Nova Mutum	MT
Inpasa	Dourados	MS
Usimat	Campos de Julio	MT
Usina Libra	São José do Rio Claro	MT
Usina Caçu	Vicentinópolis	GO
Usina Porto Seguro	Jaciara	MT
Usina Coperval	Jandaia do Sul	PR
Bioflex	Poconé	MT
Safras Biocombustível	Sorriso	MT
Usina Rio Verde	Rio Verde	GO
Cerradinho Bio	Chapadão do céu	GO
SJC Bioenergia	Quirinópolis	GO
Usina Cereale	Dois Córregos	SP
Destilla Bioenergia	Itaúba	GO

Fonte: Adaptado de ANP (2023) e Neves et al. (2021).

Como é possível observar na Tabela 4, a maior parte das usinas estão concentradas nos estados do Mato Grosso e Goiás. Esses estados são os maiores produtores de milho do Brasil, o que justifica a grande quantidade de usinas de etanol de milho. Porém, nos próximos anos usinas de etanol de milho poderão passar a operar em outros estados, como por exemplo Bahia (MERLADETE, 2022; NOVACANA, 2022b).

3.4 MILHO X CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo a ANP (2023), em janeiro de 2023, 359 usinas estão aptas a comercializar etanol no Brasil, com capacidade produtiva total de 387.428 m³/dia. Porém, essas usinas são em maioria esmagadora usinas de cana-de-açúcar. O Brasil

é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o setor sucroenergético brasileiro utiliza esse insumo a décadas no país.

O etanol de milho possui algumas vantagens sobre a cana-de-açúcar, principalmente pelo fato de o milho poder ser armazenado e utilizado mesmo após os períodos de colheita e também pela possibilidade de atuar durante a entressafra da cana-de-açúcar (NOVACANA, 2022c). Entretanto, segundo Yin et al. (2021), devido às vantagens no rendimento das culturas e nas fontes de energia, o custo do etanol derivado da cana-de-açúcar é cerca de metade do custo do etanol derivado do milho. Na Tabela 5 estão listados alguns comparativos relativos a essas duas formas de obtenção de etanol.

Tabela 5 - Comparativos de produção de etanol de milho e cana-de-açúcar

Parâmetros	Milho	Cana-de-açúcar
Ciclo de colheita	4 meses	12 a 18 meses
Rendimento de etanol/ton.	Cerca de 400L	70 a 90 L
Rendimento de etanol/ha	2,5 a 3,5 mil L	7 a 8 mil L
Tempo de fermentação	Pode chegar a 70 horas	10 a 12 horas
Coprodutos	DDG, WDG, óleo de milho	Bagaço, melaço, vinhaça
Fonte energética	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana-de-açúcar
Produção de etanol na safra 2022/2023	4,52 bilhões de L	25,82 bilhões de L

Fonte: Adaptado de SCOT CONSULTORIA (2022).

Outro fator que é importante destacar é o fato de o milho ser uma commodity importante para o Brasil, podendo assim haver flutuação de preço que pode levar a maiores custos de produção nas indústrias de etanol de milho. Segundo Neves et al. (2021), o insumo de maior custo para a usina é o milho, com cerca de 68% dos custos totais da planta produtiva. Em seguida temos a biomassa (~10%), enzimas e ácidos (~6%), mão de obra (~4%) e outros custos (~1%). Esses custos podem ser mitigados através da comercialização dos coprodutos do processo, o que demonstra a importância dos coprodutos na rentabilidade do processo de produção de etanol de milho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente estudo, foi possível caracterizar o processo produtivo de etanol de milho, sendo destacadas as etapas de preparação do insumo, moagem, hidrólise, fermentação, destilação e separação dos coprodutos. Foi possível observar semelhanças com o processo a partir de cana-de-açúcar, mas com alguns pontos divergentes, como a etapa de hidrólise e o tempo de fermentação elevado. Além disso, foi possível observar a importância dos coprodutos do etanol de milho, valiosa fonte de receita para a indústria e potencial fonte de diversificação na nutrição animal do cenário agropecuário brasileiro.

O Brasil se destaca mundialmente na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, porém nos últimos anos o etanol de milho vem se consolidando no cenário brasileiro de biocombustíveis. A principal motivação para produção de etanol de milho no país está relacionada com sua capacidade de armazenamento de grãos e a possibilidade de redução da ociosidade operacional das usinas de cana-de-açúcar. Além disso, o crescimento das super safras de milho nos últimos anos possibilitou a utilização desse cereal para a produção de etanol, ajudando a suprir as grandes demandas por combustíveis e consumindo os excedentes de produção.

A produtividade do etanol de milho vem aumentando a cada safra e a perspectiva é que o setor cresça no Brasil ainda mais nos próximos anos, principalmente no Centro-Oeste, onde o milho é abundante e há demanda dos grãos de destilaria para nutrição animal. O segmento é relativamente novo no país, mas o crescimento significativo observado nos últimos anos demonstra que o etanol de milho é uma alternativa viável para o setor sucroenergético brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOKIKA, et al. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 564-582, 2020.

ANDRIETTA, S. R. - BIOCONTAL. **Uma nova perspectiva para produção de etanol no Brasil**: Uso do milho, In: FENASUCRO & AGROCANA, agosto 2019. Disponível em: <http://www.stab.org.br/palestras_fena2019/andrietta.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2022.

ANP. **Autorização para produção de biocombustíveis**: Relatório Dinâmico de Autorizações. Atualizado em: 16 de jan. de 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/autorizacao-para-producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

AZEVEDO, R. G. N. G., **Análise econômica da produção de etanol pela integração do milho nas usinas flex e full no estado do mato grosso**. 2018 20 p. Monografia (MBA em Gestão do Agronegócio) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/58723/R%20-%20E%20-%20ROBERTA%20GRACIELA%20NOGUEIRA%20GUIMARAES%20AZEVEDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 de nov. de 2022.

BAI, F. W.; ANDERSON, W. A.; MOO-YOUNG, M. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. **Biotechnology Advances**, v. 26, n. 1, p. 89-105, 2008.

BAPTISTA, C. B. **Imobilização de enzimas na parede celular de *Saccharomyces cerevisiae* para produção de etanol a partir de amido**. 2013. 134 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Molecular) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/13195>>. Acesso em: 20 set. 2022.

BASSO, L.C.; BASSO, T. O.; ROCHA, S. N. Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and Its Impact on Yeast Fermentation. In: BERNADES, M. A. dos S. (Ed.) **Biofuel Production - Recent Developments and Prospects**. InTech, 2011, p. 86-100.

BATTAGLIA, M. et al. The broad impacts of corn stover and wheat straw removal for biofuel production on crop productivity, soil health and greenhouse gas emissions: A review. **GCB-Bioenergy**, v. 13, n. 1, p. 45-57, 2020.

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.

BERTELLI, L. G. **A verdadeira história do Proálcool**. 2005. Disponível em: <<http://www2.senado.leg.br/bdsf/handle/id/313629>>. Acesso em: 13 out 2022.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, ed. 1, 316 p., 2008. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2002>>. Acesso em: 16 set. 2022.

BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 13, p. 135-137, jul./dez. 2015.

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, 2005.

BOTT et al. **Amylase with maltogenic properties**. US 2018/0112203 A1, 20 nov. 2012, 26 abr. 2018. United States patent application publication. p.1. Disponível em: < <https://patents.google.com/patent/US20180112203A1/en> >. Acesso em: 14 nov. 2022.

CAMPOREZI, J. D.; DIAS, S. R. **Produção de etanol de milho via sacarificação e fermentação simultânea**. 2021. 47 p. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto Federal do Espírito Santo, Venda Nova do Imigrante, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/992>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

CANHA, M. A. **Rendimento de fermentação na indústria sucroalcooleira**. 2009. Monografia (Pós-Graduação em Cadeia Produtiva Sucroalcooleira) – Universidade Estadual de Maringá, Umuarama, 2009. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/monografia-rendimento-de-fermentacao/4806387/>>. Acesso em: 02 dez. 2022.

CARVALHO, R. V. de et al. Otimização das condições de cultivo para a produção de amilases pelo termofílico *Bacillus sp.* e hidrólise de amidos pela ação da enzima. **Food Science and Technology**. v. 28, n. 2 p. 380-386, 2008.

CASTRO, A. L. M. et al. Influência da temperatura na resistência ao etanol da levedura *Saccharomyces cerevisiae* Y904. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, Blucher Chemical Engineering Proceedings, 2015, p. 1173-1178, v. 1.

CHIEPPE JÚNIOR. J. B. **Tecnologia e fabricação do álcool**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 73 p. Disponível em: < http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_prd_industr/tec_acucar_alcool/161012_tec_fabric_alc.pdf >. Acesso em: 19 dez. 2022.

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: 12 de dez. de 2022.

COLUSSI, J.; SCHNITKEY, G. "Brazil: Corn Production in Three Crops per Year." **Farmdoc daily** (11):58, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2021. Disponível em: <<https://farmdocdaily.illinois.edu/2021/04/brazil-corn-production-in-three-crops-per-year.html>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim Técnico de Armazenagem**: Amostragem de Grãos. v. 1, n. 1, Brasília, p. 1-32, mar. 2015. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/item/2902-2015-boletim-tecnico-de-armazenagem-amostragem-de-graos>>. Acesso em: 20 de nov. de 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: 12 décimo segundo levantamento. Safra 2021/22, Brasília, DF, v. 9, n., set. 2022a.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **“Série Histórica das Safras: Milho”**. 2022b. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/910-Milho>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

CRIPWELL, R. A. et al. Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: achievements and challenges. **Biotechnology Advances**. v. 12, 2020.

CUNHA, J. T. et al. Consolidated bioprocessing of corn cob-derived hemicellulose: engineered industrial *Saccharomyces cerevisiae* as efficient whole cell biocatalysts. **Biotechnology for Biofuels**, v. 13, n. 138, 2020.

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.

DA CRUZ, M. G.; GUERREIRO, E.; RAIHER, A. P. A Evolução da Produção de Etanol no Brasil, no Período de 1975 a 2009. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 43, n. 4, p. 141-160, 2012.

DAVE, R.; KELSALL, D. R.; LYONS, T. P. Practical management of yeast: conversion of sugars to ethanol. In: (4th Ed.). **The Alcohol Textbook**. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries: Nottingham University Press, UK, 2003. p. 121-134.

DONKE, A. C. G. et al. Usina Flex: comparação dos desempenhos ambiental e energético do etanol de cana-de-açúcar, milho e sorgo. In: **Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida**, 5, Fortaleza, 2016. p. 364-370. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1064075>>. Acesso em: 23 nov. 2022.

DUARTE, J. de O.; MATTOSO, M. J.; GARCIA, J. C. **Milho: Importância Socioeconômica**. 2021. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica> >. Acesso em: 15 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **ANP espera sete novas usinas de etanol em 2022; no total, 23 estão em construção**. Disponível em: < <https://www.novacana.com/n/industria/usinas/anp-espera-novas-usinas-de-etanol-2022-23-construcao-080322> >. Acesso em: 12 jan. 2023.

FERREIRA, R. L. S. et al. Enriquecimento do mosto de milho com nutrientes nitrogenados e fosfatados para melhoria da fermentação alcoólica / Enrichment of corn fermentation with nitrogenated and phosphate nutrients for improvement of alcoholic fermentation. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 26131–26142, 2021.

FONSECA, M. J. de O. – **Embrapa Agroindústria de Alimentos. Secagem e Armazenamento**. Dez. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/secagem-e-armazenamento>>. Acesso em: 20 set. 2020.

FS-BIOENERGIA. “**História**”. 2022. Disponível em: < <https://www.fs.agr.br/sobre-a-fs/historia/> >. Acesso em: 04 janeiro 2022.

GODOY, A. **Processo de reaproveitamento de biomassa de levedo na integração de fermentações alcoólicas de cana e substratos amiláceos**. Depositante: Fermentec Tecnologias em Açúcar e Álcool Ltda. BR n°102017016415A2. 31 de jul. de 2017, 19 de mar. de 2019. Disponível em: < <https://patentimages.storage.googleapis.com/55/b7/8f/54249d6cdceb56/BR102017016415A2.pdf> >. Acesso em: 14 dez. 2022.

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. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94966>>. Acesso em: 13 nov. 2022.

GRIPPA, M. J. C. **Planta Flex no Mato Grosso**. 2012. 63 p. Monografia (MBA - Gestão do Agronegócio) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/44422/R%20-%20E%20-%20MARIO%20JOSE%20CACHO%20GRIPPA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >. Acesso em: 20 set. 2020.

HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 45, n. 3, p. 253-267, 2001.

IMEA – INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. **12ª Estimativa da Safra de milho – 2021/22**, Cuiabá, MT, set. 2022. Disponível em: <<https://imea.com.br/imea-site/arquivo-externo?categoria=relatorio-de-mercado/21-22&arquivo=esf-milho&numeropublicacao=68>>. Acesso em: 03 de nov. de 2022.

INPASA. “**Nossa História**”.c2023. Disponível em: <<https://www.inpasa.com.br/institucional/nossa-historia/452376>>. Acesso em: 04 jan. 2023.

INTARAMAS, K. et al. Sequential catalytic-mixed-milling and thermohydrolysis of cassava starch improved ethanol fermentation. **Food and bioproducts processing**. v.114, p. 72-84, 2019.

JACKSON, D. S.; SHANDERA JR., D. L. Corn Wet Milling: Separation Chemistry and Technology. **Journal of Advances in Food and Nutrition Research**, v. 38, p. 271-300, 1995.

KELSALL, D.; LYONS, P. Grain dry milling and cooking procedures: extracting sugars in preparation for fermentation. In: (4th. Ed.) **The Alcohol Textbook**. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries: Nottingham University Press, UK, 2003. p. 9-21.

LI, Z.; DUAN, X.; WU, J. Improving the thermostability and enhancing the Ca (2+) binding of the maltohexaose-forming α -amylase from *Bacillus stearothermophilus*. **Journal Biotechnology**, v. 222, p. 65-72, 2016.

LIMA, U. A.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. Produção de etanol. **Biotecnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2001. v. 3, 43 p.

LNF. **Leveduras selecionadas**. 2013. Disponível em: <https://lnf.com.br/downloads/leveduras_selecionadas.pdf >. Acesso em: 01 dez. 2022.

LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V. M. D.; BORGES, M. T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**: tecnologia de produção de etanol. Ufscar, São Carlos, 2011. p. 48-52.

LOPES, M. L. et al. Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. **Brazilian Journal of Microbiology**. Piracicaba, v. 47, n. 1, p. 64-76, 2016.

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. do S.M.; BATISTOTE, M. A produtividade de milho no brasil e avaliação do tratamento granulométrico para a produção de etanol. **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 107–116, 2022.

LUCHIARI, I. da C. **Imobilização de amilase comercial em pó de sabugo de milho visando à hidrólise de amido**. 2019. p. 88. Monografia (Pós-graduação em Alimentos e Nutrição) — Faculdade de Ciências Farmacêuticas - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2019. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/191570/luchiari_ic_me_arafcf_int.pdf?sequence=6 >. Acesso em: 20 set. 2022.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 64-78. 2006.

MALISZEWSKI, E. (AGROLINK). **Você sabe a diferença entre DDG e WDG?**: Grãos podem ser usados na suplementação da dieta dos bovinos. 2021. Disponível em: < https://www.agrolink.com.br/noticias/voce-sabe-a-diferenca-entre-ddg-e-wdg-_449525.html >. Acesso em: 19 dez. 2022.

MARCONDES, A. A.; LIMA, L. R. **Álcool carburante: uma estratégia brasileira**, Curitiba: UFPR, p. 248, 2002.

MARKESTRAT. **Etanol de milho e as projeções de produção para o biocombustível**. 2021. Disponível em: < <https://somosmilhoes.com/etanol-de-milho-projecoes-producao/#comments> >. Acesso em: 13 jan. 2023.

MARTINEZ-AMEZCUA, C. et al. Nutritional characteristics of corn distillers dried grains with solubles as affected by the amounts of grains versus solubles and different processing techniques. **Poultry Science**. v. 86, n. 12, p. 2624–2630, 2007.

MASSON, I. dos S. **Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar**. 2013. 49 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/99635>>. Acesso em: 12 dez. de 2022.

MELO, H., F. **Resposta ao Estresse Ácido em Leveduras da Fermentação Alcoólica Industrial**. 2006. 110 p. Tese (Doutorado em Biologia de Fungos) - Departamento de Micologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/650/1/arquivo4595_1.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2022.

MERLADETE, A. – Agrolink. **Primeira usina de etanol de milho na Bahia. 2022**. Disponível em: < <https://www.editorastilo.com.br/agro-industria/primeira-usina-de-etanol-de-milho-na-bahia/> >. Acesso em: 12 jan. 2023.

MILANE, L.V. **Secagem e armazenamento na qualidade de grãos de milho e na produção de etanol**. 2015. p. 93-107. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Chapadão do Sul, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/3208>>. Acesso em: 20 set. 2020.

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. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 41, p. 147-207, jun. 2014.

MOHANTY, S. K.; SWAIN, M. R. Bioethanol Production from Corn and Wheat: Food, Fuel, and Future. **Bioethanol Production from Food Crops: Sustainable Sources, Interventions and Challenges**. Academic Press, 2019, p. 45-59.

MOSIER, N. S.; KLEIN, E. I. How fuel ethanol is made from corn. In: (2nd. Ed.) **Bioenergy: Biomass to Biofuels and Waste to Energy**. Academic Press, 2020, p. 539-544.

MUSSOLINI, R. C. **Caracterização físico-química e rendimento da moagem úmida de quatro híbridos de milho**. 2009. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, e São José do Rio Preto, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88429>>. Acesso em: 20 set. 2022.

MUTTON, M. J. R. **Reflexos da qualidade da matéria-prima sobre a fermentação etanólica**. WORKSHOP sobre “Produção de etanol: qualidade da matéria-prima”. Lorena, 2008. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5188469/mod_resource/content/1/Artigo%202%20-%20M%C3%A1rcia.pdf#:~:text=Reflexos%20da%20qualidade%20da%20mat%C3%A9ria%20prima%20sobre%20a%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20etan%C3%B3lica.&text=A%20cana%20de%20da%C3%A7%C3%BAcar%20\(,no%20pleno%20desenvolvimento%20das%20plantas](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5188469/mod_resource/content/1/Artigo%202%20-%20M%C3%A1rcia.pdf#:~:text=Reflexos%20da%20qualidade%20da%20mat%C3%A9ria%20prima%20sobre%20a%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20etan%C3%B3lica.&text=A%20cana%20de%20da%C3%A7%C3%BAcar%20(,no%20pleno%20desenvolvimento%20das%20plantas)>. Acesso em: 02 dez. 2022.

NEVES, M. F. et al. **Etanol de Milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. 1. ed. Ribeirão Preto: UNEM, 2021. 115 p. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/wp-content/uploads/2021/05/Etanol-de-Milho-no-Brasil-Fava-Neves-et-al-2021_compressed.pdf>. Acesso em: 03 de set. de 2022.

NOVACANA. ANP autoriza operação da usina de etanol de milho da Inpasa em Dourados (MS). 2022a. **Jornal GrandDourados (MS)**, 2022a. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/industria/usinas/anp-autoriza-operacao-usina-etanol-milho-inpasa-dourados-ms-240522>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

NOVACANA. **ICM e Impacto querem construir a primeira usina de etanol de milho da Bahia**. 2022b. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/industria/usinas/icm-impacto-construir-primeira-usina-etanol-milho-bahia-080822>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

NOVACANA. **Produção de etanol de milho avança 34% em meio à quebra histórica da cana**. 2022c. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/milho/producao-etanol-milho-avanca-34-quebra-historica-cana-260422>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

PARAPOULI, M. et al. *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. **AIMS microbiology**, v. 6, n. 1, p. 1-31, 2020.

PATRONI, L.; SILVESTRE, P. **Primeira usina flex do Brasil ajuda a diversificar produção e a sustentar preços em Mato Grosso**. 2012. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/noticias/primeira-usina-flex-brasil-ajuda-diversificar-producao-sustentar-precos-mato-grosso-40495/>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

PAVEZZI, F. C. **Produção e caracterização de glucoamilases termoestáveis de *Aspergillus awamori* obtidas por PCR mutagênico e expressas em *Saccharomyces cerevisiae***. 2006. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88380>>. Acesso em: 14 nov. 2022.

PEREZ, O. E. et al. Effect of steeping time on starch properties from ground whole corn. **Journal of food engineering**, v. 60, n. 3, p. 281-287, 2003.

PORTAL DO AGRONEGÓCIO. **Usinas de MT não veem risco de oferta em 2022 mesmo que China compre milho, diz Imea**. 2022. Disponível em: <<https://www.portaldoagronegocio.com.br/energias-renovaveis/etanol/noticias/usinas-de-mt-nao-veem-risco-de-oferta-em-2022-mesmo-que-china-compre-milho-diz-imea>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

POWER, R. F. Enzymatic conversion of starch to fermentable sugars In: (4th. Ed.) **The Alcohol Textbook**. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries: Nottingham University Press, UK, 2003.p. 23-32.

PROZYN BIOSOLUTIONS. **Antimicrobianos naturais: tecnologias seguras e eficazes contra a contaminação em usinas**. 2021. Disponível em: <<https://fermentecnews.com.br/2021/02/12/antimicrobianos-naturais-tecnologias-seguras-e-eficazes-contra-a-contaminacao-em-usinas/>>. Acesso em: 12 de dez. de 2022.

QUINTERO, J. et al. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. **Energy**. v. 33, n. 3, p. 385-399, 2008.

RAUSCH, K. D. et al. Wet Milling: The Basis for Corn Biorefineries. In: **Corn** (3rd. Ed.), AACC International Press, 2019, p. 501-535.

RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Essential Energy: 2021 Pocket Guide to Ethanol**. USA, 2021. Disponível em: <<https://d35t1syewk4d42.cloudfront.net/file/276/2021-Pocket-Guide.pdf>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

RUSSELL, I. Understanding yeast fundamentals. In: (4th Ed.). **The Alcohol Textbook**. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries: Nottingham University Press, UK, 2003. p. 85-120.

SANCHES, Ó. J.; CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. **Bioresource Technology**, v. 99, n.13, p. 5270-5295, 2008.

SANTOS, J. R., MAIOR, A. M. S., GOUVEIA, E. R. Comparação entre processos em SHF e em SSF de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol por *Saccharomyces cerevisiae*. **Química Nova** [online], v. 33, n. 4, p. 904-908, 2010.

SANTOS, M. C. et al. Principais Tecnologias para Produção de Etanol Anidro no Brasil. **Revista Virtual de Química**, Sociedade Brasileira de Química, v. 13, n.6, p. 1228-1240, 2021.

SANTOS, M. S. M. et al. Energy cultures and sustainability in biofuel production. **Revista de agricultura neotropical**, Cassilândia, v. 9, n.1, p. 1-8, 2022.

SÃO MARTINHO. **Produtos**: óleo de milho, c2018. Disponível em: <<https://www.saomartinho.com.br/show.aspx?idCanal=X6afrPDKMQjL2bJXyTYuyA=>>. Acesso em: 03 dez. 2022.

SAVILLE, B.A., GRIFFIN, W.M., MACLEAN, H.L., 2016. Ethanol production technologies in the US: status and future developments. In: SALLES-FILHO, S. L. M. et al. (Eds.) **Global Bioethanol: Evolution, Risks, and Uncertainties**. Academic Press, Cambridge, MA, p. 164–166.

SCIPIONI, G. C. **Otimização do processo de sacarificação do amido de batata (*Solanum Tuberosum L.*) utilizando enzimas amilolíticas**. 2011. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7954/SCIPIONI%2C%20GUSTAVO%20CALLEGARI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 set. 2022.

SCOT CONSULTORIA. **DDG & WDG**: Análise dos preços do DDG e WDG em dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.scotconsultoria.com.br/Relatorio_DDG/221228_Rel_DDG_58_def.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SECCHES, T.O. et al. Brazilian industrial yeasts show high fermentative performance in high solids content for corn ethanol process. **Bioresources and Bioprocessing**. v. 9: 97, 9 p., 2022.

SENAR – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Grãos**: armazenamento de milho, soja, feijão e café. Brasília: Senar, 2018. 100 p. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/216-ARMAZENAMNTOS-GR%C3%83OS.pdf>>. Acessado em: 20 set. 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.

SIVARAMAKRISHNAN, S. S. et al. Alpha amylase production by *Aspergillus oryzae* employing solid-state fermentation. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 66, n. 8, p. 621-626, 2007.

SOBRINHO, P. TNS – Conab/Sureg-MT. Processo (simplificado) de produção de etanol de milho – destilaria/usina flex - abordagem descritiva de um novo potencial Mato Grosso. **CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO**, Superintendência Regional de Mato Grosso, Cuiabá, p 1-9, 2012.

SOUSA, J. L. U.; MONTEIRO, R. A. B. Fatores interferentes na fermentação alcoólica para a produção de etanol. **Fazu em revista**, Uberaba, n. 8, p. 100-107, 2012.

SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T. Investigação dos Processos de Gelatinização e Extrusão de Amido de Milho. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 24-30, 2001.

SPIER, M.R. **Produção de enzimas amilolíticas fúngicas α -amilase e amiloglucosidase por fermentação no estado sólido**. 2005. p. 124-127. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/4684/disser?sequence=1>>. Acesso em: 13 nov. 2022.

STONEX. **Brasil produz milho em três safras por ano**. ago. 2022. Disponível em: <<https://www.mercadosagricolas.com.br/inteligencia/brasil-produz-milho-em-tres-safra-por-ano/#:~:text=Assim%2C%20o%20Brasil%20j%C3%A1%20conta,%2C%20de%20janeiro%20a%20abril>>. Acesso em: 03 jan. 2023.

UDOP - UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA. **Etanol de milho: país deve chegar a 8 bilhões de l até 2028**. 2021. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2021/07/16/etanol-de-milho-pais-deve-chegar-a-8-bilhoes-de-l-ate-2028.html>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

UNEM – UNIÃO NACIONAL DO ETANOL DE MILHO. **UNEM: Produção de etanol de milho chega a 4,5 bilhões de litros e eleva participação para 15% do mercado nacional**. 2022a. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2022/05/03/unem-producao-de-etanol-de-milho-chega-a-4-5-bilhoes-de-litros-e-eleva-participacao-para-15-do-mercado-nacional.html>>. Acesso em: 20 de novembro de 2022.

UNEM – UNIÃO NACIONAL DO MILHO. **Setor Do Etanol De Milho Prospecta Exportação De Farelos De DDGS**. 2022b. Disponível em: <<https://etanoldemilho.com.br/2022/12/01/setor-do-etanol-de-milho-prospecta-exportacao-de-farelos-de-milho/>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

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

VASCONCELOS, J. N. Fermentação etanoica. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Bioenergia, Açúcar e Álcool: tecnologias e perspectivas**. Viçosa. Cap 15, p 407-453, 2010. Disponível em:

<<http://docente.ifrn.edu.br/samueloliveira/disciplinas/tecnologia-de-fabricacao-de-biocombustiveis/bioetanol/apostila-2-processo-de-producao-de-etanol-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 03 dez. 2022.

VÁSQUEZ, M. P. et al. Enzymatic hydrolysis optimization to ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. v. 136, p. 141-154, 2007.

VOCA, N. E et al. Progress in ethanol production from corn kernel by applying cooking pre-treatment. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 10, p. 2712-2718, 2009.

WALKER, G. M.; WALKER R. S. K. Chapter three - Enhancing yeast alcoholic fermentations. In: GAAD, G. M; SARIASLANI, S. **Advances in Applied Microbiology**, Academic Press, v. 105, p. 87–129, 2018.

XU, J. et al. Gelatinization dynamics of starch in dependence of its lamellar structure, crystalline polymorphs and amylose content. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 229, n. 1, 11 p., 2020.

YIN MA, X. R. et al. Hydrogen and ethanol: Production, storage, and transportation. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 54, p. 27330-27348, 2021.

ZAMBRZYCKI, G. C.; DO VALE, A. T.; DANTAS, V. F. de S. Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea mays*). **Evidência**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 153, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.unoesc.edu.br/evidencia/article/view/4075>>. Acesso em: 07 jan. 2023.