



BEATRIZ DUQUE EVANGELISTA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MILHO
PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

**LAVRAS – MG
2022**

BEATRIZ DUQUE EVANGELISTA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MILHO
PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Graduação em Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel

Prof. Dr. João Moreira Neto
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

BEATRIZ DUQUE EVANGELISTA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO MILHO
PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Graduação em Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel

Prof. Dr. João Moreira Neto
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Luciene, que em toda sua simplicidade e diante de todas as dificuldades, me ajudou na realização desse objetivo acadêmico. À Deus, por ter me dado forças para percorrer minha trajetória acadêmica e por iluminar minha mente em momentos difíceis. Aos meus familiares, por todo apoio, amor e compreensão. Ao meu orientador, Professor João Moreira Neto, pela atenção, paciência e disposição para correção e auxílio na elaboração deste trabalho. Aos meus amigos pela parceria, companheirismo e apoio durante todos os momentos. À todos os professores que fizeram parte dessa jornada, proporcionando ajuda e incentivo durante toda a graduação. E, por fim, à Universidade Federal de Lavras por todas as oportunidades e ensinamentos que vou levar para minha carreira profissional e para a vida.

RESUMO

O mercado de biocombustíveis brasileiro produziu em 2020 o volume de 34 bilhões de litros de etanol, processando 660 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, se tornando o maior produtor mundial de etanol a partir da cana-de-açúcar. Vem ganhando força uma nova possibilidade de produção para o Brasil: o etanol de milho. Essa matéria-prima é usada nos Estados Unidos, maior produtor mundial de etanol. A produção de etanol no Brasil a partir do grão de milho se consolidou como uma realidade viável, competitiva e lucrativa para a indústria do álcool na última década. Isso se faz porque o milho soluciona os problemas resultantes: do período ocioso da entressafra da cana-de-açúcar; da validade de utilização da cana como matéria-prima; da logística dispendiosa do armazenamento dos grãos de milho na agricultura; e ainda, agrega valor ao grão de milho que no passado apresentava instabilidade nos preços de suas sacas. A rentabilidade gerada pelo uso do milho como matéria-prima na indústria de etanol, a redução dos impactos ambientais e outras questões estratégicas são evidenciadas no modelo de operação das usinas Flex e Flex Full, em que o milho é utilizado como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar na produção de etanol.

Palavras-chave: Etanol. Milho. Moagem Seca. DDGS. Usinas Flex.

ABSTRACT

The Brazilian biofuels market produced in 2020 the volume of 34 billion liters of ethanol, processing 660 million tons of sugarcane, becoming the world's largest producer of ethanol from sugarcane. A new production possibility for Brazil is gaining strength: corn ethanol. This raw material is used in the United States, the world's largest producer of ethanol. The production of ethanol in Brazil from corn grains has been consolidated as a viable, competitive and profitable reality for the ethanol industry in the last decade. This is done because corn solves the resulting problems: the idle period of the sugarcane off-season; the validity of using sugarcane as a raw material; the costly logistics of storing corn grains in agriculture; and still, it adds value to the corn grain that in the past presented instability in the prices of its bags. The profitability generated by the use of corn as a raw material in the ethanol industry, the reduction of environmental impacts and other strategic issues are evidenced in the operating model of the Flex and Flex Full plants, in which corn is used as a complementary raw material to the sugarcane in ethanol production.

Keywords: Ethanol. Corn. Dry Grinding. DDGS. Flex Plants.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Histórico da produção de etanol no Brasil e EUA | 13 |
| Figura 2 – Composição do grão do milho | 17 |
| Figura 3 – Trecho de macromolécula do amido formada por ligações glicosídicas entre | 19 |
| Figura 4 – Estrutura molecular da amilose | 19 |
| Figura 5 – Estrutura molecular da amilopectina..... | 20 |
| Figura 6 – Estrutura tridimensional da α -amilase..... | 21 |
| Figura 7 – Estrutura tridimensional da glucoamilase produzida por <i>Aspergillus niger</i> | 22 |
| Figura 8 – Estrutura tridimensional da β -amilase..... | 22 |
| Figura 9 – Estrutura do moinho de martelo | 23 |
| Figura 10 – Produção de etanol via moagem seca..... | 24 |
| Figura 11 – Fogão a jato | 25 |
| Figura 12 – Catálise enzimática do amido | 26 |
| Figura 13 – Reações de fermentação | 28 |
| Figura 14 – Conversão do amido em açúcares | 29 |
| Figura 15 – DDGS do milho | 31 |
| Figura 16 – Etapas de produção de etanol..... | 32 |
| Figura 17 – Produção de etanol via moagem úmida | 33 |
| Figura 18 – Milho utilizado na produção de etanol nos Estados Unidos, União Europeia e ... | 36 |
| Figura 19 – Usinas de etanol de milho no Brasil e suas capacidades..... | 38 |
| Figura 20 – Fluxo de energia do sistema de produção de etanol de milho..... | 40 |
| Figura 21 – Fluxo energético da FS Bioenergia | 41 |
| Figura 22 – Energia necessária para produção de ureia. | 43 |
| Figura 23 – Produtividade do etanol em 2017 de acordo com a matéria-prima..... | 46 |
| Figura 24 – Usinas de etanol de milho no Brasil..... | 50 |
| Figura 25 – Emissões de CO ₂ na produção de etanol de milho nos Estados Unidos | 59 |
| Figura 26 – Emissões de gases de efeito estufa para a produção de 1 MJ de etanol hidratado para os diferentes cenários industriais..... | 60 |
| Figura 27 – Redução do percentual de emissão de GEE comparado à gasolina..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Produção mundial de etanol em milhões de toneladas | 14 |
| Tabela 2 – Produção brasileira de etanol em milhões de litros | 14 |
| Tabela 3 – Produtividade mundial do milho na safra de 2020/2021 | 37 |
| Tabela 4 – Atividades consumidoras de energia na produção de etanol | 40 |
| Tabela 5 – Consumo energético de utilidades nos Estados Unidos na cultura do milho | 42 |
| Tabela 6 – Consumo energético de Fertilizantes no Brasil | 42 |
| Tabela 7 – Análise das matérias-primas usadas no etanol..... | 45 |
| Tabela 8 – Balanço energético da produção de etanol de milho | 47 |
| Tabela 9 – Balanço energético da produção de etanol de cana-de-açúcar | 47 |
| Tabela 10 – Ciclo de vida energético do etanol por diferentes matérias-primas..... | 47 |
| Tabela 11 – Caso 1 | 53 |
| Tabela 12 – Caso 2 | 53 |
| Tabela 13 – Caso 3 | 53 |
| Tabela 14 – Caso 4 | 54 |
| Tabela 15 – Caso 5 | 54 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABIMILHO | Associação Brasileira de Indústrias de Milho |
| ARMS | <i>Agricultural Resource Management Study</i> (Estudo de Gestão de Recursos Agrícolas) |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| Capex | <i>Capital Expenditure</i> (Despesas de Capital) |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| DDGS | <i>Dried Distillers Grains</i> (Grãos Secos de Destilaria) |
| EC | <i>European Commission</i> |
| EPLCA | <i>European Platform on Life Cycle Assessment</i> (Plataforma Europeia de Avaliação do Ciclo de Vida) |
| ERS | <i>Economic Research Service</i> (Serviço de Pesquisa Econômica) |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) |
| ISSO | <i>International Standard Organization</i> (Organização Padrão Internacional) |
| PECEGE | Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas |
| RFA | <i>Renewable Fuels Association</i> (Associação de Combustíveis Renováveis) |
| UDOP | União Nacional de Bioenergia do Brasil |
| UNEM | União Nacionalidade de Etanol de Milho |
| UNEP | <i>United Nations Environmental Program</i> (Programa Ambiental das Nações Unidas) |
| USDA | <i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) |
| WDG | <i>Wet Distillers Grains</i> (Grãos Destilados Úmidos) |
| WDGS | <i>Wet Distillers Grains with Solubles</i> (Grãos de Destilaria Úmidos com Solúveis) |

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. | O MERCADO DE ETANOL..... | 12 |
| 3. | PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL DE MILHO | 16 |
| 3.1. | Milho | 16 |
| 3.2. | Amido..... | 18 |
| 3.3. | Enzimas Amilases | 20 |
| 3.4. | Produção de etanol de milho via moagem seca..... | 23 |
| 3.4.1. | Cozimento | 24 |
| 3.4.2. | Liquefação..... | 25 |
| 3.4.3. | Sacarificação e Fermentação | 26 |
| 3.4.4. | Destilação e desidratação | 30 |
| 3.4.5. | DDGS | 30 |
| 3.5. | Produção de etanol de milho via moagem úmida..... | 32 |
| 3.5.1. | Maceração | 33 |
| 3.5.2. | Separação | 35 |
| 3.5.3. | Extração..... | 35 |
| 3.5.4. | Secagem, conversão em xarope de glicose e fermentação..... | 35 |
| 4. | ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL..... | 36 |
| 4.1. | Produtividade e Energia | 39 |
| 4.1.1. | Comparativo do gasto energético para a produção de etanol de milho versus etanol de cana de açúcar | 45 |
| 4.2. | Usinas Flex | 48 |
| 4.3. | Viabilidade econômica | 50 |
| 4.4. | Viabilidade ambiental..... | 56 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os problemas relativos ao desenvolvimento econômico mundial estão relacionados com a capacidade energética de cada país. Essa dependência decorre do uso de fontes de carbono fóssil. Neste cenário a produção de fontes alternativas para suprir a demanda energética mundial tem extrema importância, além de proporcionar expansão dos países em crescimento a partir do uso de fontes provenientes da agricultura (VILELA et al., 2006) (PAULILLO et al., 2006).

Nesse contexto, políticas públicas têm estimulado a produção de energia renovável em diversos países. Estima-se que as fontes alternativas de energia provenientes da agricultura mundial vem recebendo aumento significativo de investimento (GONÇALVES JUNIOR et al., 2009). Mas pouca atenção vem sendo dada aos estudos do balanço energético e impactos ambientais associados, que estabelecem a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida na sua obtenção, incluindo o processo agrícola e industrial (SOLOGUREN, 2007).

Nos últimos anos, no mercado mundial, o milho tem sido fortemente utilizado como matéria-prima na crescente demanda por combustíveis renováveis. Esse grão tornou-se uma das principais fontes para produção de etanol no mundo (SOLOGUREN, 2007). A produção mundial de etanol, em 2020, foi de 101 milhões de toneladas. Os Estados Unidos produziram 54%, a partir do milho, e o Brasil contribuiu com 30% desse volume, produzindo álcool a partir da cana-de-açúcar, sendo os países líderes de mercado nesse setor (SOUZA et al., 2007).

Desde os esforços iniciais em 2014, o setor de etanol de milho já vivencia um crescimento robusto no cenário nacional, principalmente na instalação de usinas *flex* ou integradas entre cana-de-açúcar e milho (UNEM, 2020), que têm sido feitas para solucionar os problemas relacionados à entressafra da cana. Grande parte do parque industrial concentra-se no Centro-Oeste, que reúne condições fundamentais para a produção, oferta elevada de matéria-prima a preços baixos e fretes elevados para exportação. Fatores como otimização da planta produtiva ao longo do ano, sinergias operacionais e benefícios trazidos pela introdução do milho, como possibilidade de armazenamento e maior gerenciamento de risco, já são notados no ambiente empresarial (MILANEZ et al., 2014; NASTARI, 2018).

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo apresentar o estudo do processo produtivo do etanol através da utilização do milho, o processo de tratamento do amido utilizado como base para geração do álcool e os subprodutos gerados. Além disso, foi analisada

a viabilidade industrial em comparação com a cana-de-açúcar nos setores econômicos, energéticos e ambientais. Por fim, foi feita uma análise sobre a integração do milho como matéria-prima suplementar na produção de etanol de cana-de-açúcar.

2. O MERCADO DE ETANOL

O etanol é utilizado como forma de combustível no estado líquido e é proveniente, principalmente, da biomassa renovável (BNDES, 2008). A principal diferença entre o etanol e os derivados do petróleo é o elevado teor de oxigênio, que compõe cerca de 35% em massa do etanol (BNDES, 2008). Esse álcool pode ser utilizado como combustível em motores de combustão interna com ignição por centelha (ciclo Otto) de duas maneiras: anidro, em mistura com a gasolina; ou hidratado, comercializado via bombas específicas nos postos de abastecimento, em veículos movidos exclusivamente a etanol e em veículos bicombustível, também conhecidos como *flex fuel* (BNDES, 2008).

O bioetanol é uma substância com fórmula química ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$). A hidroxila (-OH) garante polaridade ao álcool, que assim pode ser misturado em água. Em temperaturas em torno de 25°C (temperatura ambiente), o bioetanol é encontrado na forma líquida, pois só atinge seu ponto de ebulição em temperatura superior a 78°C e solidificação abaixo de -114°C. Na temperatura de 13°C o etanol atinge seu ponto de fulgor e entra em combustão quando colocado em contato com qualquer fonte de calor. Na temperatura de 363°C, ele atinge o ponto de autoignição em que a combustão ocorre sem o contato com outra fonte (INMETRO,2012).

A produção de biocombustíveis foi impulsionada pelo fato da matriz energética mundial ser altamente dependente do petróleo, fonte de energia não renovável. Além dessa, outras motivações levaram ao crescimento desse mercado, como evolução das políticas e técnicas do setor rural e aumento das exigências legais de preservação ambiental. O milho aparece como uma das matérias-primas mais utilizadas no mundo para os mais diversos objetivos, incluindo a produção de etanol, com elevado grau de rendimento nas agroindústrias (YACOBUCCI et al.,2007).

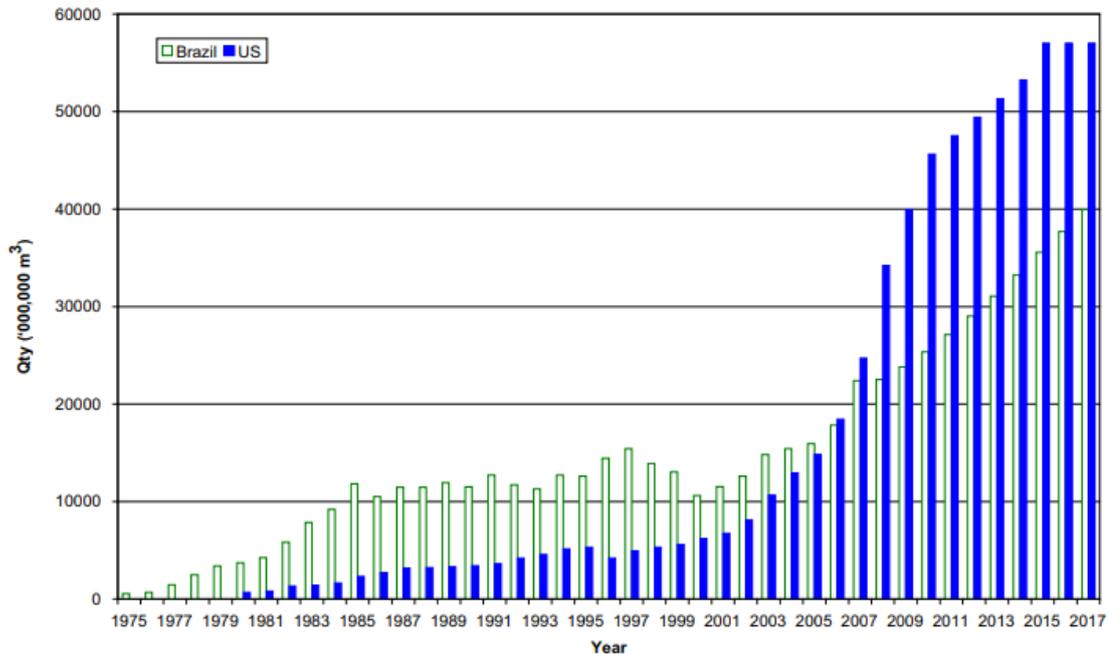
No cenário mundial, os Estados Unidos ocupam a primeira posição na produção de etanol, utilizando milho como principal matéria-prima, com geração de 75,42 bilhões de litros no ano de 2021 (RUBENICH,2021) e 205 plantas localizadas na região Corn Belt (Cinturão de milho) norte-americana voltadas exclusivamente para cultivo da matéria, que resultou 138 milhões de toneladas colhidas para serem usadas na fabricação do álcool no ano de 2020 (ESTADOS UNIDOS, 2020).

O Brasil é o maior exportador de etanol do mundo e o segundo maior produtor depois dos Estados Unidos, mas sendo a cana-de-açúcar a principal matéria-prima utilizada, ocupando o primeiro lugar como produtor de etanol de cana (RFA,2020).

Ambos os países produzem etanol desde a década de 1970, com os EUA superando o Brasil em níveis de produção desde 2006, como mostrado na Figura 1. A participação do milho

na produção mundial de etanol aumentou de 5% em 2000 para 29,7% em 2022 (SYNGENTA, 2022).

Figura 1 – Histórico da produção de etanol no Brasil e EUA



Fonte: RFA - Renewable Fuels Association (2020).

Além da produção do etanol, a economia geral norte-americana apresentou rendimento significativo no mercado relacionado à nutrição animal, pela utilização dos DDGS gerados como coprodutos no processo de moagem do milho (GERMANI,2011).

Os países que compõem a União Europeia possuem a terceira maior produção mundial de etanol, com previsão de que a produção, as importações e o consumo do produto se mantenham constantes nos próximos anos. A China é o quarto maior produtor mundial do álcool, mas com demanda enfraquecida, pois não há indícios de que o governo chinês tenha o interesse de investir no etanol como componente misturado à gasolina (EC, 2019).

Na Índia, quinto maior produtor mundial de etanol, a política nacional sobre biocombustíveis entrou em vigor em maio de 2018. Essa política prevê alcançar uma mistura em 20% de etanol, percentual muito acima do nível de mistura até 2019 de 1,4%. Porém, o mercado não apresenta crescimento, evidenciado na Tabela 1, pois existem dificuldades com a disponibilidade de matéria-prima e recursos disponíveis para importações (OCDE-FAO, 2020).

Tabela 1 – Produção mundial de etanol em milhões de toneladas

| Países | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Estados Unidos | 58.344,52 | 60.324,29 | 60.797,47 | 59.718,63 |
| Brasil | 25.589,37 | 25.967,91 | 29.980,45 | 32.440,96 |
| União Europeia | 5.212,51 | 5.299,57 | 5.413,14 | 5.450,99 |
| China | 3.198,67 | 3.255,45 | 3.974,68 | 3.406,87 |
| Índia | 1.040,99 | 794,94 | 1.514,16 | 2.006,27 |
| Canadá | 1.650,44 | 1.779,14 | 1.817,00 | 1.892,71 |
| Tailândia | 1.218,90 | 1.400,6 | 1.476,31 | 1.589,87 |
| Argentina | 999,35 | 1.097,77 | 1.097,77 | 1.097,77 |
| Outros | 1.854,85 | 1.567,16 | 2.078,19 | 2.286,39 |
| Total | 99.109,60 | 101.486,84 | 108.149,16 | 109.890,87 |

Fonte: RFA - Renewable Fuels Association (2020).

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima usada no Brasil para a produção de etanol, com produção concentrada nas regiões Sudeste e Centro-oeste. No entanto, no ano de 2020 a produção brasileira de cana-de-açúcar se retraiu em decorrência de variações climáticas em algumas regiões (CONAB,2020).

Tabela 2 – Produção brasileira de etanol em milhões de litros

| Região | 2018/2019 | 2019/2020 | 2020/2021 |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Sudeste | 19.378.209,0 | 20.274.236,0 | 17.128.153,3 |
| Centro-oeste | 9.993.609,0 | 11.335.690,0 | 11.408.247,8 |
| Nordeste | 1.941.275,0 | 2.115.104,8 | 1.679.483,4 |
| Norte | 208.901,0 | 238.160,0 | 231.548,6 |
| Sul | 1.621.080,0 | 1.713.990,2 | 1.542.750,0 |
| Total | 33.143.074,0 | 35.677.180,9 | 31.990.183,0 |

Fonte: CONAB (2020).

Por outro lado, nas últimas safras tem ocorrido forte crescimento da utilização de milho para a produção de etanol no Brasil, notadamente no Centro-Oeste. Entre a safras 2013/14 e 2019/20, o volume da produção de etanol de milho subiu de 37 milhões de litros para 791,4 milhões de litros chegando a quase 5% da produção nacional do biocombustível e a tendência é de que continue em expansão, inclusive com a instalação de novas unidades de produção (CONAB,2020) (SYNGENTA,2022).

3. PROCESSO PRODUTIVO DE ETANOL DE MILHO

Para a produção de etanol, primeiramente deve ser levado em consideração a matéria-prima a ser utilizada, sendo essa proveniente da biomassa natural, para que a taxa de liberação de gás carbônico no processo de fotossíntese desse material seja a menor possível. Sendo assim, esse álcool pode ser produzido por meio de matérias-primas que tenham em sua composição açúcares ou amido (MACEDO,2007).

O processo de composição do etanol pode ser separado em três grupos. Quando a matéria-prima utilizada é formada pelo açúcar sacarose e contemplam açúcares que podem ser diretamente consumidos, como o que ocorre na cana-de-açúcar, beterraba, colmo (sorgo sacarino) e sucos de frutas em geral, o etanol faz parte do grupo dos produtos sacarídeos. Quando a base da composição é o amido, contido nos cereais, como milho e mandioca em que o polissacarídeo deve primeiro ser hidrolisado para gerar açúcares fermentescíveis, o etanol produzido é do grupo amiláceos. Por fim, quando o etanol é composto por meio da celulose que também pode ser convertida em etanol, através de diferentes tratamentos que tornam possível a hidrólise dos polissacarídeos e o acesso dos microrganismos aos monossacarídeos provenientes destes materiais, como a contida em eucalipto, marmeleiro, serragem, bagaço de cana, pericarpo de babaçu e casca de arroz, o etanol faz parte do grupo de matérias-primas celulósicas. (MACEDO, 2007) (CARDONA e SÁNCHEZ, 2007)

3.1. Milho

O milho tem sua origem no México. Seu cultivo marcou um grande avanço para a atividade de agricultura e fixação da sociedade primitiva. Nos dias de hoje, seu grão é produzido em grande escala por todos os lugares do mundo, sendo considerado o alimento de principal consumo por humanos e animais. O grão de milho é composto por casca ou pericarpo, gérmen e endosperma, como mostrado na Figura 2. O óleo do milho é extraído do germén, o pericarpo é separado como fibra de milho e no endosperma está o amido utilizado para produzir etanol (SERNA-SALDIVAR,2018).

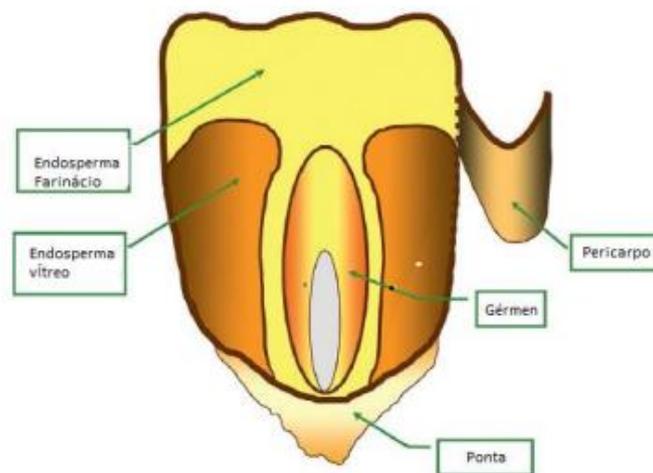
Em sua composição, o milho possui uma faixa de 70 a 75% do seu peso formado por amido, 10% de proteínas e o restante dividido em fibras, gérmen e cinzas (BNDE, 2008).

O milho sofre limitações durante seu processo de crescimento e desenvolvimento, por fatores como a disponibilidade de água, temperatura e radiação solar. Assim, para otimizar seu potencial produtivo, é fundamental que as condições de temperatura, precipitação

pluviométrica e fotoperíodo alcancem os níveis considerados ideais (PEREIRA FILHO, 2010). Apesar de ser uma cultura bem adaptada a climas secos, o milho precisa de grande quantidade de água. Durante o ano pode consumir até 600mm de água, mas consegue reproduzir onde as precipitações variem de 250 mm até 5.000 mm anuais. (CRUZ et al., 2006).

A radiação solar tem impacto direto na cultura dos grãos, pois dela depende o processo fotossintético, já que 90% da matéria seca do milho provém da fixação de CO₂ pela fotossíntese. Assim, redução da intensidade luminosa em 30% a 40% por longos períodos retarda a maturação do grão e causa uma queda na produção (CRUZ et al., 2006).

Figura 2 – Composição do grão do milho



Fonte: EKHOFF (2003).

Observando a Figura 2, o endosperma representa aproximadamente 83% da massa seca do grão, sendo a maior parte composta por amido (88%), com formato granular. A outra parte da estrutura do pericarpo é referente à proteína reserva, que representa 8% da massa seca. Essa proteína envolve os grânulos de amido formando os corpos protéicos que compõem a matriz dentro das células no endosperma. Com base na distribuição dos grânulos de amido e da matriz de proteína, o endosperma é classificado em dois tipos: farináceo e vítreo (ABIMILHO,2006).

No endosperma farináceo, os grânulos de amido são arredondados e estão dispersos, não havendo matriz protéica em volta dessas estruturas, o que resulta em poros durante o processo de secagem do grão, a partir dos espaços antes ocupados pela água, durante o desenvolvimento do grão. Por outro lado, no endosperma vítreo, a matriz protéica é densa, com corpos protéicos firmes, que circundam os grânulos de amido de formato poligonal, não permitindo espaços entre estas estruturas (ABIMILHO,2006).

O gérmen representa 11% do grão de milho em base seca e concentra quase a totalidade dos lipídeos: óleo e vitamina E (83%), dos minerais (78%), além de conter quantidades importantes de proteínas (26%) e açúcares (70%) (ABIMILHO,2006).

O pericarpo representa, em média, 5% do grão, sendo a estrutura que protege os outros arranjos da umidade em excesso, insetos e microrganismos. As camadas de células que compõem essa fração são constituídas de polissacarídeos do tipo hemicelulose (67%) e celulose (33%) (ABIMILHO,2006).

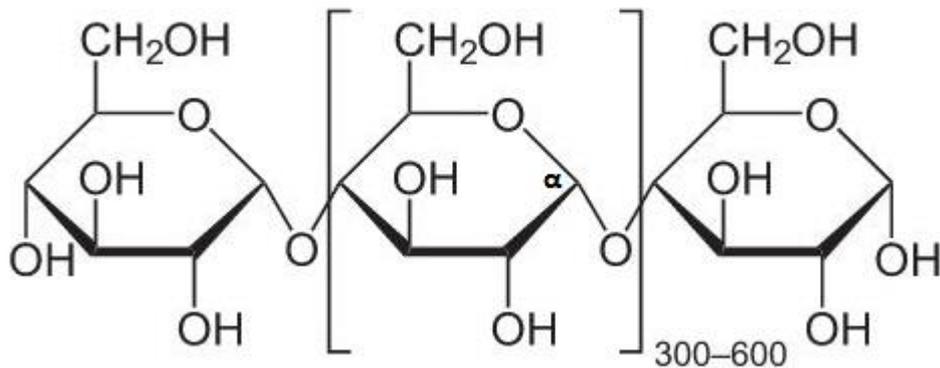
A ponta é a menor parte da estrutura, 2% do grão, e é responsável pela conexão do grão ao sabugo, sendo a única área não coberta pelo pericarpo. Sua composição é essencialmente de material lignocelulósico (ABIMILHO,2006).

3.2. Amido

O amido é um polímero natural e está presente em uma diversidade de plantas, garantindo a elas fonte de reserva para geração de energia. É abundante em tubérculos (65% a 85% do peso seco), leguminosas (30% a 50% do peso seco), frutas verdes (40% a 70% do peso seco) e grãos de cereais, incluindo o milho (40 a 90% do peso seco) (LAJOLO et al., 2008) e também faz parte da nutrição humana, com média de 85% dos carboidratos em forma de polissacarídeos consumidos em sua alimentação. É largamente utilizado na indústria alimentícia e, em menor escala, pelas indústrias farmacêutica e têxtil (SERNASALDIVAR,2018). O amido é a base da produção de etanol.

Esse composto é formado pelo agrupamento de moléculas de glicose, como ilustrado na Figura 3, em ligações alfa que resultam em polissacarídeos chamados amilose e amilopectina. A ligação glicosídica pode ser classificada em alfa ou beta dependendo da posição do radical hidroxila que participa da ligação, que é alfa, quando a hidroxila está do lado direito do carbono anomérico, que é o carbono ligado ao oxigênio central. Se a hidroxila está do lado esquerdo ela formaria uma ligação beta. (WANG et. al.,2022).

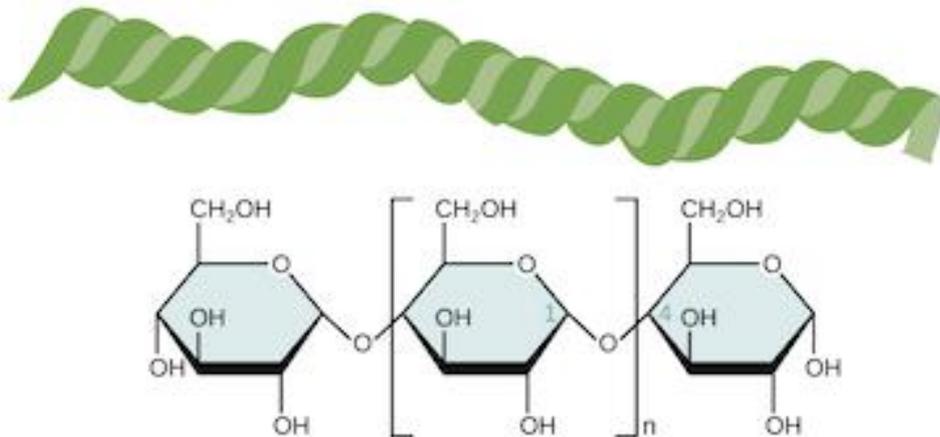
Figura 3 – Trecho de macromolécula do amido formada por ligações glicosídicas entre moléculas de α -glicose da amilose



Fonte: NEUROtiker, 2020.

A amilose ilustrada na Figura 4, possui função de garantir maior resistência ao grânulo de amido pelo fato de possuir ligações lineares de cadeia longa sem ramificação com ligações alfa-1,4 (isto é, ligações em que os átomos de carbono 1 e 4 de dois monômeros formam uma ligação glicosídica) entre as moléculas de glicose (CAI et al.,2014). Ela compõe cerca de 24% a 27% do amido do milho (AEHLE, 2007)

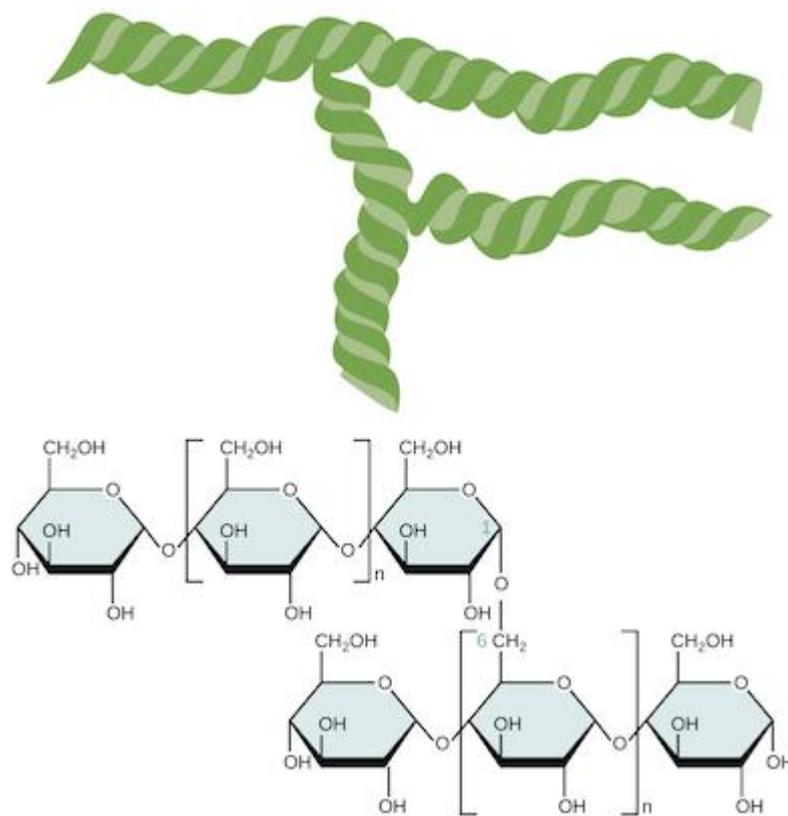
Figura 4 – Estrutura molecular da amilose



Fonte: OpenStax Biology (2018).

A amilopectina ilustrada na Figura 5, tem a função de carga de glicogênio e devido às suas ligações de 40 unidades de glicose com ligações alfa-1,4 ramificadas com ligações alfa-1,6 (carbono número 1 de uma unidade de glicose ligada ao carbono número 6 de outra unidade) possui baixa viscosidade. A amilopectina está presente em maior quantidade no amido do milho, com média de 70% da sua composição (AEHLE 2007).

Figura 5 – Estrutura molecular da amilopectina



Fonte: OpenStax Biology (2018).

3.3. Enzimas Amilases

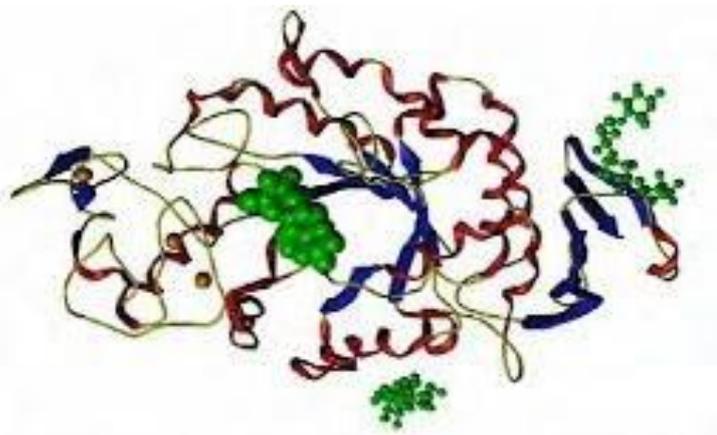
As características de algumas enzimas amilolíticas dependem de diversas variáveis e parâmetros físicos, como a estabilidade e condições ótimas de atuação. As amilases são comumente sintetizadas na natureza por meio de tecidos animais, leveduras, bactérias, plantas e fungos. No entanto, aquelas produzidas por microrganismos termofílicos (conseguem sobreviver e se multiplicar em altas temperaturas) e termotolerantes (capazes de fermentar açúcares em 24 horas a 45°C), são usadas nos processos de sacarificação que ocorrem em altas

temperaturas (GÚZMAN-MALDONADO; PAREDES-LÓPEZ, 1995; GOTO et al., 1998; PEIXOTO et al., 2003).

Essas enzimas podem ser divididas em duas categorias com base no local que agem: endoamilases e as exoamilases. As endoamilases hidrolisam as ligações glicosídicas ao acaso no interior da molécula de amido liberando oligossacarídeos, enquanto as exoamilases hidrolisam as ligações glicosídicas a partir da extremidade não redutora da molécula liberando glicose ou maltose (GUZMÁN-MALDONADO; PAREDES-LOPEZ, 1995).

As α -amilases são expostas na Figura 6 e correspondem a endoamilases, que atuam ao acaso no interior da molécula de amido e hidrolisam as ligações α -1,4, liberando oligossacarídeos de diversos tamanhos (dextrinas). No entanto, a especificidade das α -amilases para ligações glicosídicas α -1,6 não é absoluta. Algumas α -amilases podem degradar ligações α -1,6, porém, a taxa destas reações é muito menor comparada à quebra de ligações α -1,4. Os principais produtos de hidrólise do amido pela ação das α -amilases são maltotriose, maltotetraose, maltopentaose, maltose e glicose (NAJAFI et al., 2005). Comercialmente, a α -amilase é produzida por meio de microrganismos como *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus licheniformis* (BON,2008).

Figura 6 – Estrutura tridimensional da α -amilase

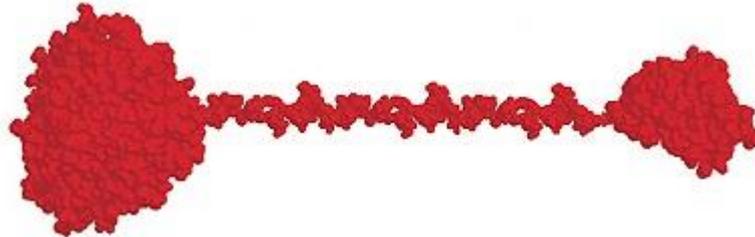


Fonte: LOTTERMAN (2012).

As glucoamilases, também conhecidas como amiloglucosidases podem ser observadas na Figura 7 e são produzidas principalmente por fungos. São exoamilases que catalisam a quebra de ligações glicosídicas α -1,4 a partir de uma extremidade não redutora da molécula de amido. Ela pode atuar tanto nas moléculas de amilose ou amilopectina do grânulo de amido como em oligossacarídeos relacionados. Em uma velocidade menor, as glucoamilases também atuam hidrolisando as ligações α -1,6. Sugere-se, portanto, que a ação ocorra por meio de um

mecanismo aleatório em toda a molécula de substrato (NAJAFI et al., 2005; EZEJI; BAHL, 2006). As glucoamilases são enzimas produzidas pelos organismos *Aspergillus niger*, *Rhizopus delemar* e *Rhizopus oryzae* (BON,2008).

Figura 7 – Estrutura tridimensional da glucoamilase produzida por *Aspergillus niger*.

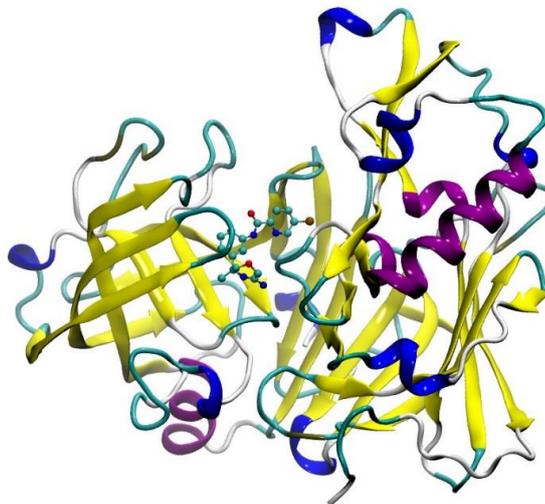


Fonte: Adaptado de Diretório UNESP (2020).

As isoamilases e pululanases são endoamilases desramificantes que hidrolisam as ligações α -1,6 de amilopectina, glicogênio, várias dextrinas ramificadas e oligossacarídeos. As isoamilases têm sido encontradas em poucas linhagens de microrganismos e são usadas para desramificarem a molécula de amido na produção de glicose e maltose (NAJAFI et al., 2005).

As β -amilases (Figura 8) são exoamilases que hidrolisam a penúltima ligação α -1,4 a partir de extremidade não redutora da molécula (amilose, amilopectina e glicogênio) liberando maltose. Além da hidrólise, há uma inversão da configuração anomérica da maltose, que é liberada na configuração β . São encontradas em várias plantas como cevada, trigo, batata doce e feijão, e raramente em microrganismos. Esta enzima não é capaz de hidrolisar ligações α -1,6 dos substratos ramificados (NAJAFI et al., 2005).

Figura 8 – Estrutura tridimensional da β -amilase



Fonte: Instituto de Física (2019).

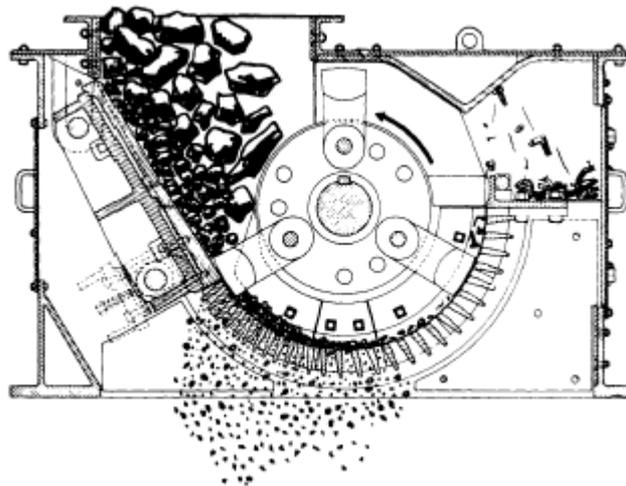
3.4. Produção de etanol de milho via moagem seca.

O processo de produção do etanol e a formação de coprodutos é determinado pela etapa de moagem do milho, que pode seguir dois métodos distintos: via moagem seca ou via moagem úmida.

Anteriormente ao início da moagem, o milho passa por um processo rigoroso de limpeza. Em uma primeira etapa, ocorre aspiração de resíduos (poeira, partículas, pedaços de caule). Em seguida, passa pela etapa de separação, em que as partículas grossas e grãos quebrados são retirados. Por fim, são utilizados imãs para remoção de partículas de metal (SERNA-SALDIVAR,2018).

Na etapa de moagem seca ilustrada na Figura 10, o grão do milho é convertido em pó, sem adição de soluções, para assim ser fracionado em casca, óleo e amido. O moinho de martelo (Figura 9) é o equipamento mais utilizado para isso. Os coprodutos moídos podem variar de acordo com suas composições e características físicas, que podem ser divididas em compostos oleosos e DDGS (BNDES,2008).

Figura 9 – Estrutura do moinho de martelo



Fonte: ATCP- Associação dos Técnicos em C&P (2007).

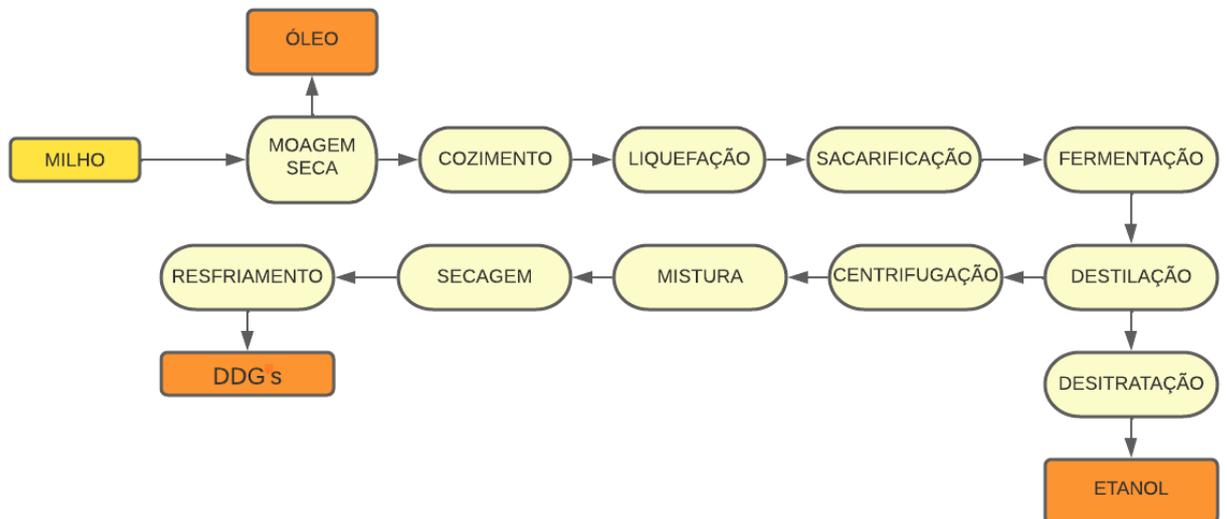
Apesar de não proporcionar grande variedade de produtos, como no caso úmido, as inúmeras melhorias realizadas no processo seco tornaram-no uma opção com custos de investimento e operação mais baixos, reduzindo consideravelmente o custo final de produção de etanol e, por isso, essa operação é a mais utilizada no Brasil (BNDES, 2008). Nos Estados Unidos, 90% do processo de moagem é por via seca (SERNA-SALDIVAR,2018).

Para a otimização da produção de etanol, as partículas de pó do grão de milho precisam estar uniformemente distribuídas. Quando as partículas são muito finas o procedimento de

liquefação e cozimento do amido é otimizado, mas a separação de DDGs é dificultada. Se os grãos saem do moinho muito grossos, nem todo o amido fica disponível para fermentação (GRIPPA,2012).

Uma vez moído, o milho é misturado com água para formar uma espécie de massa gelatinosa. O pH do mosto é ajustado para 6,0 com amônia seguido pela adição de 1/3 da α -amilase total utilizada no processo. A α -amilase é adicionada para começar a quebrar o polímero de amido e produzir dextrinas. Assim, o processo segue para a etapa de cozimento (BRUCE et. al.,2008).

Figura 10 – Produção de etanol por via seca



Fonte: Adaptado de Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social Brasil e Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008).

3.4.1. Cozimento

Após o processo de moagem seca, o amido se separa das células vegetais do milho no processo de cozimento, em que os grãos moídos são aquecidos em temperaturas acima de 110°C (SCIPIONI,2011).

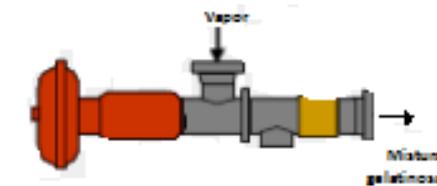
O pó é transferido do moinho para uma espécie de fogão a jato (Figura 11). O fogão a jato (*jet cooker*) é um reator que realiza um bombeamento e possui tubo especial que usa vapor para aquecer e cortar os grânulos de amido. A farinha de milho é mantida em temperatura

elevada por vários minutos juntamente a um bombeamento através de um tubo de retenção equipado com uma válvula de contrapressão. (BRUCE et. al.,2002)

Nessa etapa ocorre a chamada gelatinização do mosto. A gelatinização é a etapa de ruptura da conformação da molécula de amido para facilitar a posterior catálise enzimática (CEREDA,2003). A água é absorvida pelos grãos de farinha formando uma goma. (PEREIRA,2017)

O cozimento é, na maioria das vezes, realizado de forma contínua e em vapor sob pressão. A pressão tem o objetivo de redução do tempo e temperaturas requeridas no processo (MACHADO,2006), que é realizado de forma a exigir menor proporção de água possível, para evitar grandes gastos energéticos (CEREDA,2003). Também nessa etapa, o pH da mistura é corrigido para 4,5-5,0 com ácido clorídrico, fosfórico ou sulfúrico, para se obter ambiente propício para ação das enzimas amilases na liquefação (CEREDA,2003).

Figura 11 – Fogão a jato



Fonte: Adaptado de Chegg (2020).

3.4.2. Liquefação

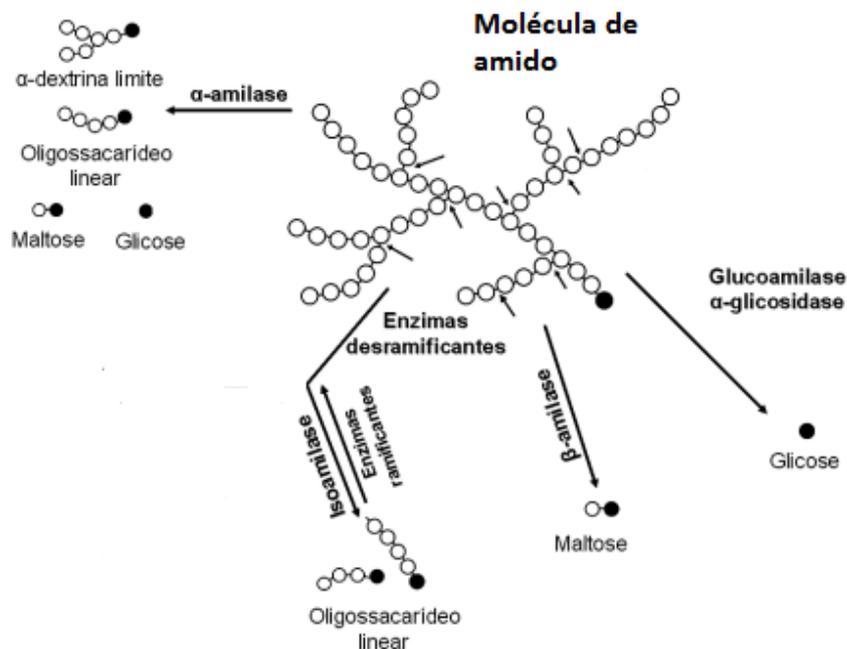
O material gelatinizado segue para a etapa de liquefação, em que enzimas produzem oligossacarídeos e dextrinas num processo de catálise enzimática. O mosto flui do tubo de retenção para um tanque e a temperatura é reduzida para 80-90°C. O restante da α -amilase é adicionado e o mosto é misturado por pelo menos 30 minutos (MALDONADO et al.,1995). A rota de catálise enzimática com a alfa-amilase é a mais utilizada nos processos de produção de etanol (MALDONADO et al.,1995).

Nesse procedimento, a α -amilase age na cadeia amilótica, realizando sua função e são gerados produtos com média de 80% de maltose, oligossacarídeos e dextrinas (BON,2008). Após ação da α -amilase na degradação do amido, parte das enzimas glucoamilases são adicionadas e catalisam as moléculas de oligossacarídeos e dextrinas transformando-as em glicose (AEHLE,2007).

O rendimento da alfa-amilase é dependente do tipo de microrganismo que formou a enzima. De maneira geral, a temperatura ótima da enzima varia de 50 a 90 °C e o pH ótimo entre 4,5 e 7,0 (MALDONADO, 1995). Para as glucoamilases, a melhor temperatura enzimática é entre 50°C e 60°C, podendo se deteriorar caso ocorra aumento de temperatura, e inativando-se completamente à temperaturas maiores que 65 °C. Sua melhor faixa para pH é entre 4,0 e 5,0 (APAR et al.,2004). Por esse motivo, a liquefação que satisfaz a operação das duas enzimas ocorre de 50 a 60°C com pH em torno de 4,5-5,0.

As enzimas desramificadoras isoamilases também são empregadas na catálise das ligações alfa-1,6 e as β -amilases são aplicadas para atuar nas extremidades das moléculas de amilose e amilopectina (APAR, et al.,2004). A catálise enzimática é descrita na Figura 12.

Figura 12 – Catálise enzimática do amido



Fonte: Adaptado de VAN DER VEEN et al (2000).

3.4.3. Sacarificação e Fermentação

A solução liquefeita de partículas de açúcar formada por oligossacarídeos e dextrinas, é resfriada a 32,5°C em um resfriador adicional ao processo ou no próprio tanque de liquefação para iniciar a etapa sacarificação por meio do restante das enzimas glucoamilases. Essa etapa ocorre juntamente com a fermentação. A glucoamilase degrada as dextrinas e produz glicose e a levedura consome a mesma como substrato na etapa de fermentação. O processo realizado

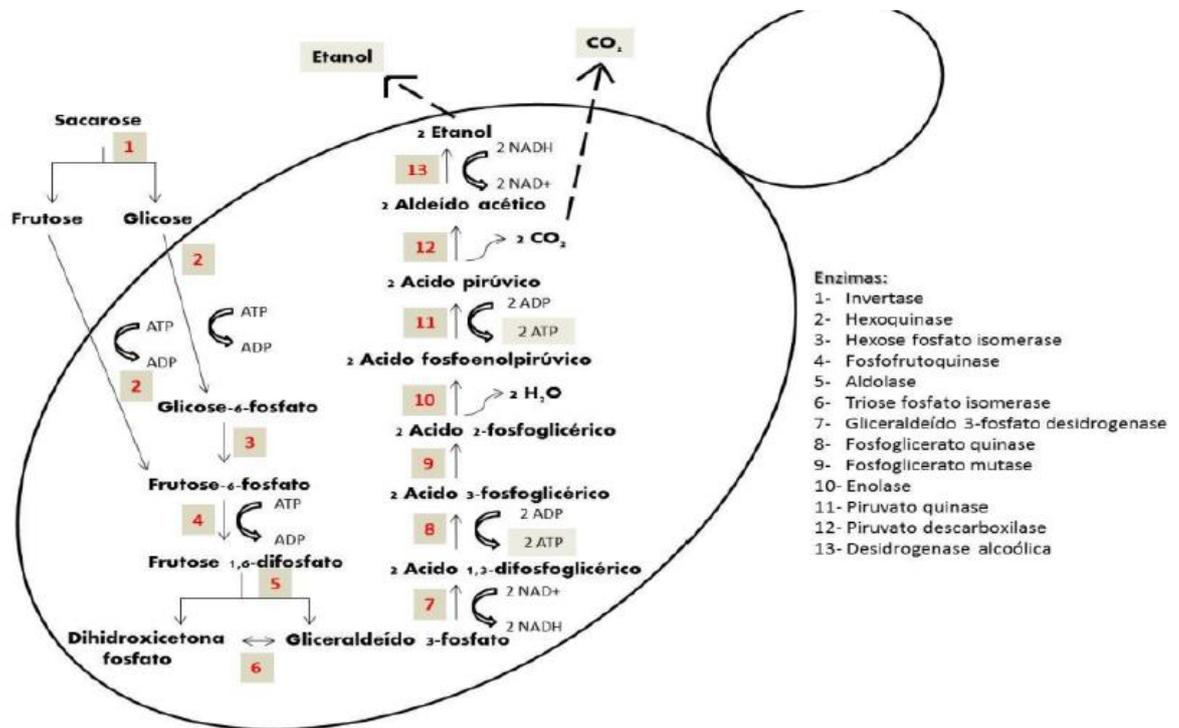
juntamente com a fermentação reduz os gastos com operações unitárias adicionais e o tempo de produção do etanol. Esses tratamentos podem ser feitos simultaneamente pelo fato dos açúcares serem rapidamente liberados no início do processo de sacarificação (GRIPPA, 2019).

O processo de fermentação é referente à oxidação bioquímica incompleta de açúcares, produzindo substâncias orgânicas oxidáveis. Para a produção de etanol, a fermentação é realizada pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*. No momento posterior à ação da glucoamilase, as enzimas da levedura fazem reações sucessivas e convertem a glicose e frutose em piruvato, que vai ser degradado pela enzima piruvato descarboxilase gerando acetaldeído e desprendendo CO₂. Por fim, a enzima desidrogenase alcóolica reduz o acetaldeído à etanol (MISSAWA, 2009).

Na fermentação alcoólica ocorrem doze reações, observadas na Figura 13, que podem ser resumidas em: fosforilação da glicose e frutose, que consumindo duas moléculas de ATP, forma-se frutose 1,6-difosfato; conversão em ácido pirúvico, que produz quatro moléculas de ATP; descarboxilação do piruvato e redução de aldeído acético em etanol (LIMA,2001). Simplificadamente, a fermentação pode ser resumida na reação da Equação 1:



Figura 13 – Reações de fermentação

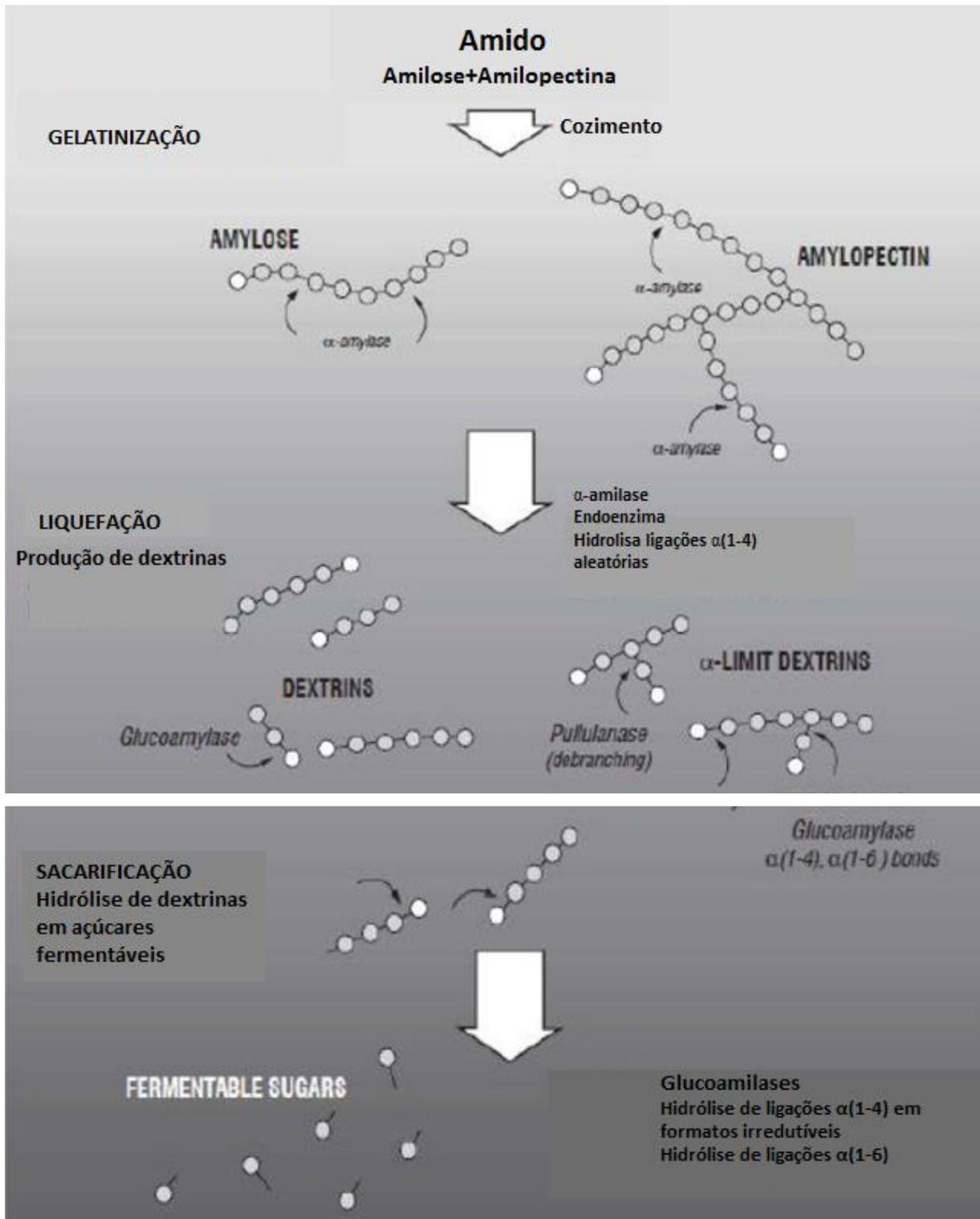


Fonte: COSTA (2017).

A fermentação dos açúcares pode ser dividida também em um processo de pré-fermentação no qual a levedura se adapta ao meio, a fermentação propriamente dita que ocorre a produção de etanol e dióxido de carbono, e um período de pós-fermentação, em que a atividade celular diminui, pela redução da produção dos gases de dióxido de carbono, indicando o fim da fermentação (WANG,2015).

A duração da fermentação é em média 55 horas quando ocorre juntamente à sacarificação. A média de temperatura é 32,5°C. As propriedades controladas para que a fermentação seja eficaz são qualidade substrato, ausência de contaminantes, tolerância do microrganismo à inativação, aeração, pH e temperatura (WANG,2015). Além disso, o indicativo de alta eficiência na conversão dos açúcares em etanol é a baixa taxa de morte celular de leveduras durante a fermentação (WANG,2015). A figura 14 ilustra o processo posterior à catálise enzimática realizada por via seca.

Figura 14 – Conversão do amido em açúcares



Fonte: Adaptado de NOVOZYMES (2010)

3.4.4. Destilação e desidratação

Após a etapa de fermentação, o produto segue para as colunas de destilação, onde o material de topo é o etanol hidratado, ou também, etanol anidro. O etanol hidratado pode ser armazenado ou desidratado (BNDE,2008).

Por ser uma mistura azeotrópica, a destilação não separa o álcool da água. A solução recorrente em nosso país é a desidratação por ciclohexano que forma uma mistura azeotrópica ternária com ponto de ebulição inferior ao etanol anidro. A recuperação do etanol hidratado gera um produto de fundo com composição 99,7%. Além desta, também é possível desidratar o álcool com adsorção em peneiras moleculares, processo que vem crescendo no Brasil apesar do custo, devido a separação eficaz dos contaminantes. A produção de etanol de milho é finalizada com o armazenamento de toda cadeia produtiva de interesse comercial. O etanol de milho é armazenado em tanques, os *Dried Distiller's Grains* ou DDGS em silos e o óleo refinado pode ser armazenado em vasos ou tanques de armazenamento (BNDE,2008).

3.4.5. DDGS

O material de fundo dos destiladores é enviado às centrífugas que separam as partes sólidas da solução com o objetivo de serem enviadas aos secadores obtendo um produto final com 14 a 10% de umidade pronto para comercialização, o DDGS, que é bastante utilizado como ração animal devido ao seu grande teor proteico (GRIPPA,2012).

O DDGS, sigla referente ao termo em inglês *Dried Distiller's Grains* ou grãos secos de destilaria, é um coproduto com alto valor nutritivo e é ilustrado na Figura 15 (REIS et. al., 2020). Os grãos apresentam alta concentração de proteína e fibra bruta, sendo a maior parte insolúvel (PEDERSEN, 2014). A principal fonte de variação na composição dos DDGS está na secagem, em que as alterações se dão quanto à temperatura utilizada, podendo influenciar na disponibilidade da proteína (SHIM,2011).

Quando a composição dos DDGS atingem proporções acima de 39% de proteína bruta, os grãos são considerados como de alta proteína (DDGS *high protein*). Os DDGS *high protein* são produzidos quando o farelo e o gérmen são retirados, enquanto o endosperma é direcionado para fermentação e produção do etanol, porém esse coproduto contém menor teor lipídico (SHIM et. al., 2011).

Nos Estados Unidos, esses grãos foram inicialmente vistos como uma fonte de substituição à proteína da soja, porém, na década de 90 houve um aumento na produção de etanol e dessa forma um aumento do coproduto na forma úmida e seca, estimulando o interesse do uso deste como fonte de energia. Esses produtos podem funcionar, portanto, como ração de alta qualidade para bovinos, suínos, aves e peixes. Essa ração pode ser uma alternativa econômica ao milho (KLOPFENSTEIN et al., 2008).

O resíduo WDG refere-se aos grãos destilados úmidos ou do inglês *Wet Distillers Grains*, que se adicionado aos condensados solúveis dá origem aos grãos úmidos de destilaria com solúveis, do inglês *Wet Distillers Grains with Solubles* (WDGS). É um coproduto da moagem seca que não é submetido à secagem após a destilação como os DDGS (ALVES et al., 2012), como analisado na Figura 16. Esses grãos também são utilizados na nutrição de animais.

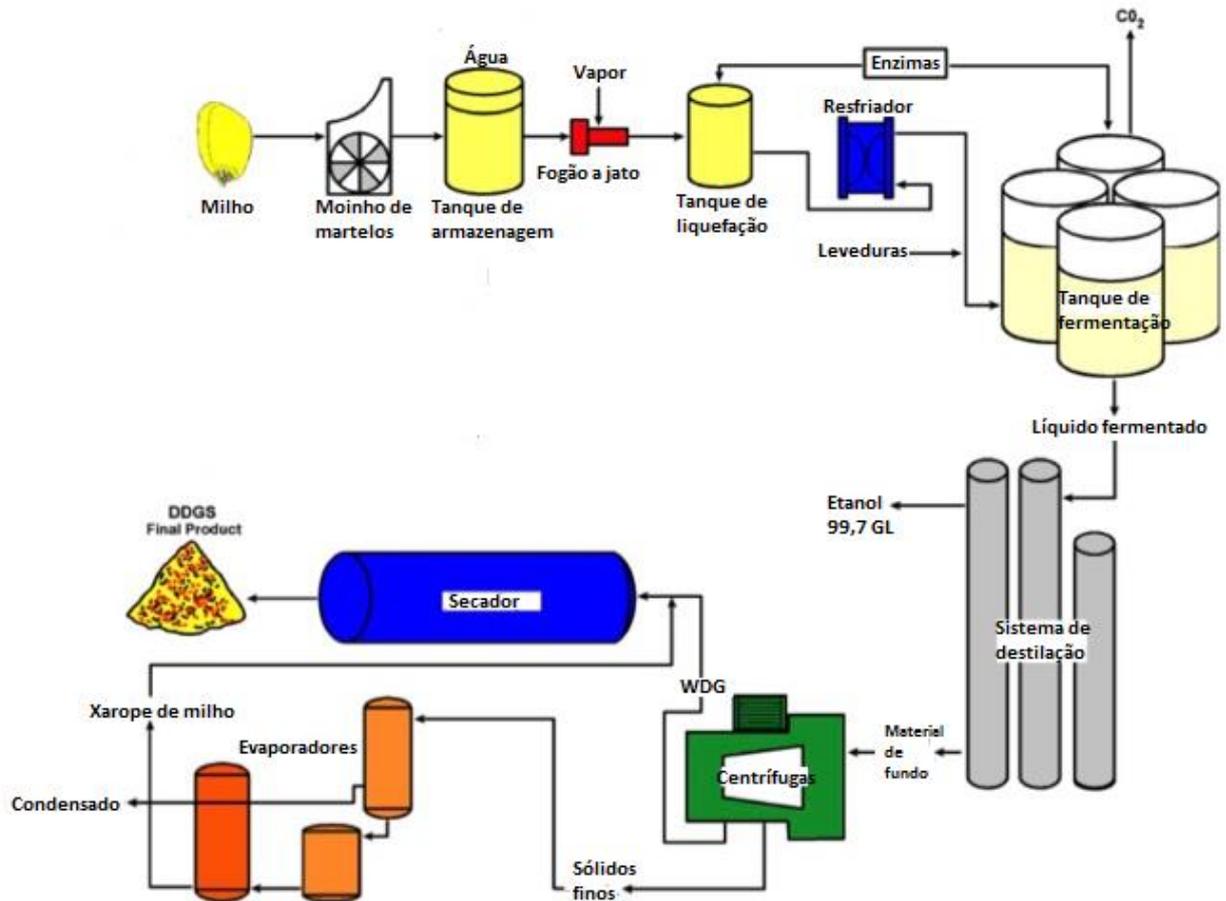
Figura 15 – DDGS do milho



Fonte: Inpasa (2019).

Todo o processo é simplificado na Figura 16, que representa o diagrama PFD da moagem seca.

Figura 16 – Etapas de produção de etanol



Fonte: Adaptado de Chegg (2020).

3.5. Produção de etanol de milho via moagem úmida.

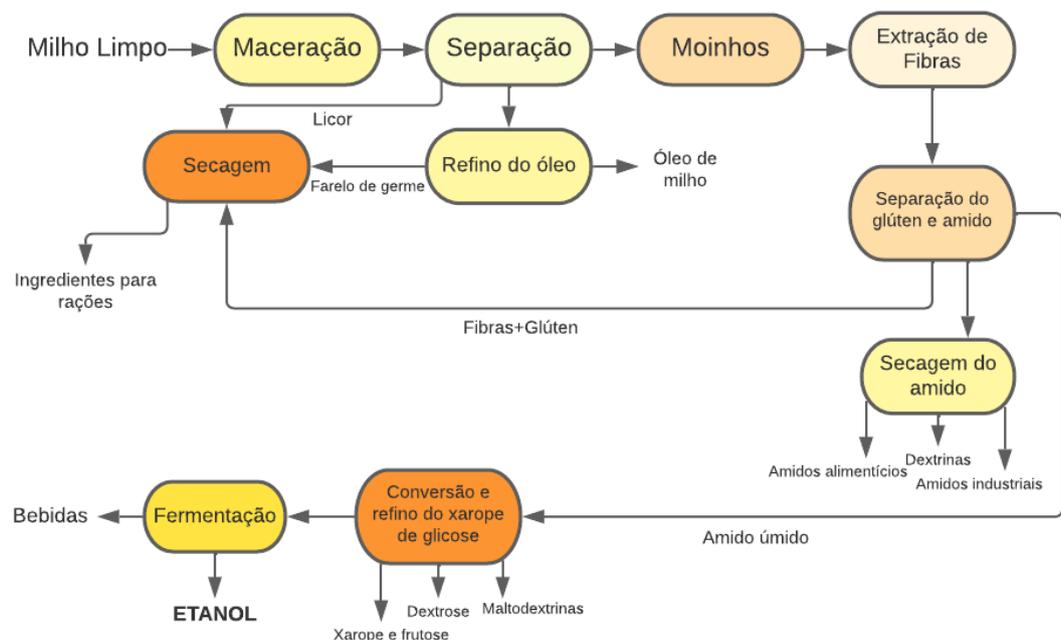
O procedimento de moagem por via úmida (Figura 17) é, muitas vezes, comparado ao refino de petróleo, pelo fato de que o grão passa por um processo de fracionamento que promove sua utilização para uma infinidade de produtos. Em contrapartida, os moinhos utilizados demandam maior gasto energético e, por esse motivo, esse procedimento é mais caro (SERNA-SALDIVAR, 2018).

A moagem úmida de milho é um procedimento que visa a recuperação e purificação do amido e de diversos coprodutos (gérmen, glúten, fibra, óleo de milho). Assim, o amido é separado dos demais sólidos, hidrolisado por enzimas para a liquefação e sacarificação, obtendo-se uma alta concentração de glicose, fermentada em seguida para a obtenção do etanol. (SERNA-SALDIVAR, 2018)

A primeira etapa de tratamento do milho na moagem úmida é chamada de maceração, em que os grãos são imersos em solução aquosa de dióxido de enxofre (SO₂) sob condições efetivamente controladas. Os rendimentos para esse método de moagem são: 67,5% de amido, 7,5% de gérmen, 5% de glúten, 11,5% de fibra e 7,6% de compostos solúveis em água. (SERNA-SALDIVAR,2018).

No processo de moagem úmida, a fibra de milho é combinada com o licor de maceração e farinha de germén sem óleo para compor a ração de glúten de milho. Além disso, nas operações realizadas, o amido gera outros produtos além do etanol, como xarope de milho rico em frutose (HFCS), dextroses, aminoácidos, ácido láctico e outros. A principal operação para isolar as frações de milho ocorre no processo de maceração (BRUCE et. al.,2008).

Figura 17 – Produção de etanol por via úmida



Fonte: Adaptado de: ABIMILHO (2008).

3.5.1. Maceração

No processo de maceração, o objetivo principal é controlar o amaciamento do milho através de um monitoramento de temperatura e concentração com a adição de solução aquosa de dióxido de enxofre afim de, posteriormente, a massa resultante ser separada e moída

(ECKHOFF; WATSON,2009). Essa operação é considerada a mais importante no processo de formação do etanol por via úmida e passa por uma sequência de procedimentos que envolvem reações químicas e bioquímicas e lixiviação (HAUSKY,2016). Além disso, a maceração dos grãos demanda alto investimento e tempo de processamento, podendo chegar a 48 horas devido à resistência do milho em absorver a solução aquosa. (PERES, et. Al.,2002)

Para esse método, é utilizado volume significativo de água, na proporção de 1,2 a 1,48 toneladas para cada tonelada de milho. A duração desse processo é dependente de fatores como produto desejado, fabricante, eficiência dos equipamentos, etc. (RAUSCH,2016). Por esse conjunto de fatores, a moagem úmida não é tão recorrente na produção de etanol no país.

O esperado é que o milho consiga absorver em média 42,5% do seu peso em água, perca 6% da sua massa seca para o meio aquoso e incorpore de 0,2 a 0,4 mg de dióxido de enxofre por quilograma. (ECKHOFF; WATSON,2009)

A maceração é dividida em três fases:

Fase 1: Refere-se à completa hidratação do milho e ocorrência de um processo fermentativo por meio da microbiota presente no próprio grão. Nessa fase, ocorre também o desenvolvimento da *Lactobacillus* sp com produção de ácido lático em determinadas faixas de concentração da solução aquosa e temperatura. Os açúcares produzidos atuam como substrato de fermentação. Esta fase se encerra à medida que a concentração de dióxido de enxofre do meio chegue a 300ppm (ECKHOFF; WATSON,2009).

Fase 2: Nesta fase ocorre difusão da solução de SO₂ no grão do milho. À medida que esse processo ocorre, vão acontecendo reações das proteínas do milho, permitindo liberação do amido. (ECKHOFF; WATSON,2009).

Fase 3: Nesta etapa, ocorre saturação de dióxido de enxofre no grão até um valor de equilíbrio no sistema, finalizando assim, a absorção da solução. A concentração de SO₂ no meio chega a 2500 ppm. Assim, um processo de hidrólise das ligações de proteínas do endosperma ocorre, favorecendo o rendimento da separação delas com o óleo, o amido e um resíduo de líquido utilizado na fermentação (ECKHOFF; WATSON,2009).

3.5.2. Separação

Após a maceração, a pasta passa por um separador projetado para desalojar o germen, que contém cerca de 30% de óleo. A separação ocorre com base na densidade mais baixa do germen. A fração recuperada é refinada em seguida para extrair o óleo de milho e a farinha de germen residual é misturada em ração de glúten de milho num processo de secagem. (BRUCE et. al.,2008)

3.5.3. Extração

A proteína e o amido passam pelos moinhos e seguem para a etapa de extração da fibra presente na pasta. Nesta etapa, a mistura moída passa por telas de metal. Enquanto a fibra fica retida nas telas, a proteína e o amido passam através delas. (BRUCE et. al.,2008)

Dando seguimento ao processo, a proteína é separada do amido com base na diferença das densidades utilizando equipamentos de centrifugação. A proteína recuperada (glúten) é vendida como farinha de glúten. O amido é lavado para remover a proteína residual. (BRUCE et. al.,2008)

3.5.4. Secagem, conversão em xarope de glicose e fermentação.

O amido limpo, passa pelo processo de secagem se usado para produção de etanol é enzimaticamente hidrolisado em glicose usando α -amilase seguida de glucoamilase, tal como acontece com a moagem a seco. Assim, o fogão a jato é usado durante o cozimento e o tanque na etapa de liquefação. São realizadas etapas separadas de sacarificação e fermentação. Para auxiliar na sacarificação, as enzimas isoamilases são adicionadas (BRUCE et. al.,2008).

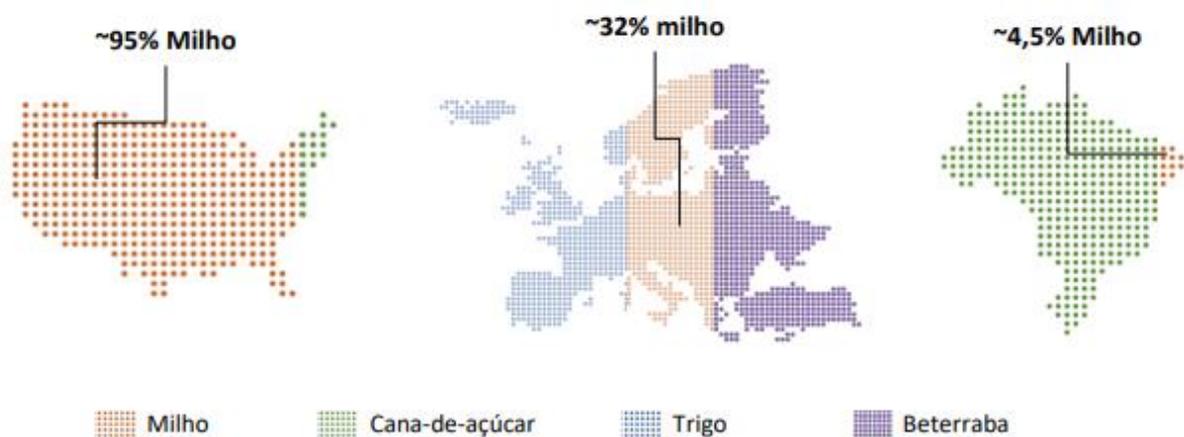
A fermentação é frequentemente executada de forma contínua em temperatura de 40°C em um esquema em cascata, o que reduz a quantidade de levedura seca necessária. Amoníaco ou ureia, bem como o líquido recuperado da imersão no processo de maceração também são adicionados ao caldo de fermentação para otimizarem o pH do mosto entre 4,5. E 5,0. A formação de espuma é muitas vezes um problema em fermentações de moagem úmida, porque o óleo de milho foi removido, o que requer a adição de um agente antiespumante (BRUCE et. al.,2008).

4. ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO NO BRASIL

A produção de etanol a partir do processamento de milho é uma atividade recente no Brasil, porém apresenta taxa de crescimento significativa. Com 17 unidades em operação, uma em pré-operação e 23 unidades em projeto, a produção de etanol de milho cresceu 92% entre abril e outubro de 2020, em relação ao mesmo período do ano anterior. O principal destino do etanol de milho é o mercado interno (UNEM,2021).

A participação brasileira no mercado produtor de etanol de milho, em 2019, foi de 1,5% da produção mundial (2,8% do que é produzido nos Estados Unidos) (RFA,2020). Outros países também iniciaram sua participação na produção do biocombustível do milho, como Argentina e Paraguai (DOLABELLA,2011). Entre os três maiores produtores mundiais de etanol, a porcentagem do álcool produzido através do milho é mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Milho utilizado na produção de etanol nos Estados Unidos, União Europeia e Brasil no ano de 2020.



Fonte: Esgtech (2021).

Em contrapartida, o Brasil ocupa a terceira posição como produtor mundial de milho, com 96 milhões de toneladas do grão produzidas na safra de 2018/2019 (USDA,2019) e 86 milhões na safra de 2020/2021, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Produtividade mundial do milho na safra de 2020/2021

| País | 2020/2021 (milhões de toneladas) | % |
|----------------|---|------------|
| Estados Unidos | 360,25 | 31,8 |
| China | 260,67 | 22,8 |
| Brasil | 86,00 | 9,9 |
| União Europeia | 64,47 | 5,5 |
| Argentina | 50,00 | 4,4 |
| Índia | 31,51 | 3,3 |
| Ucrânia | 30,30 | 2,5 |
| México | 27,00 | 2,3 |
| Outros | 206,91 | 17,6 |
| Total | 1.117,11 | 100 |

Fonte: Adaptado de USDA (2021).

O estado de Mato Grosso é o maior produtor de milho do Brasil, com cultivo de 31,31 milhões de toneladas métricas, representando 31,3% da produção nacional da safra 2018/2019. A produção bem sucedida da cultura do milho no estado, se deve às condições climáticas favoráveis e material genético de alto desempenho (CONAB, 2017). Apesar de localizado numa área composta por Floresta Amazônica e parte de vegetação pantaneira, a maior parte das regiões produtoras de milho no estado de Mato Grosso está localizada em região de cerrado, com estação seca bem definida. Num ano regular, o período de chuvas se estende dos meses de outubro a abril (PEREIRA et. al.,2020).

Por esse motivo, a distribuição geográfica das usinas de etanol de milho no Brasil tem predominância na região central, principalmente no estado do Mato Grosso. O Centro-Oeste passou de 15,6 milhões de toneladas em 2008/2009, ou 31% da produção nacional do grão, para 53 milhões de toneladas ou 53% da produção nacional da safra de 2018/2019. Assim se torna responsável por 82% da expansão produtiva de etanol de milho do país (CONAB, 2019). A Usimat, localizada no estado, foi a pioneira na instalação da indústria Flex, com produção de etanol de milho e cana-de-açúcar em 2012 (CONAB,2018). A distribuição das usinas e suas capacidades estão dispostas na Figura 19.

Figura 19 – Usinas de etanol de milho no Brasil e suas capacidades



Fonte: NEVES et. al. (2021).

A evolução dos projetos de etanol a partir do milho foi com a metodologia Flex, posteriormente explicada, até 2017, até a inauguração da FS Bioenergia, localizada em Lucas do Rio Verde (MT) que tem produção totalmente voltada para o milho (UNEM,2020).

Kappes et al. (2009), Seben Junior et al., (2014) e Osaki & Batalha (2015) apontam as vantagens na utilização do plantio integrado de milho e soja nos setores ambientais e econômicos. Do ponto de vista econômico, a possibilidade de uma segunda safra de milho gera e diversifica a receita do produtor, contribui para diluir os custos fixos e otimiza o uso da terra.

Outro ponto importante a ser analisado é referente ao lucro adicional gerado pelos coprodutos que garantem maior rentabilidade aos modelos de produção do país aumentando a receita em até 12,5% numa planta flex que opere durante o ano todo. Sem a venda desses coprodutos a rentabilidade estimada cairia de 17,3% para 2,9% (MILANEZ et al. 2014).

4.1. Produtividade e Energia

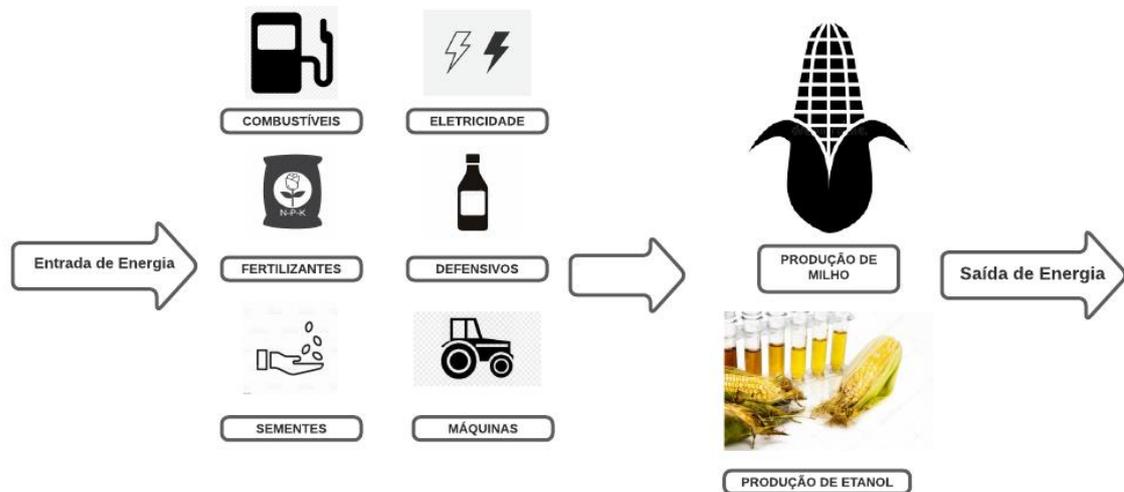
Para a produção de etanol, o consumo de energia elétrica é significativo, independente da matéria-prima utilizada. Mesmo que esse álcool tenha o propósito de ser uma alternativa de substituição de recursos fósseis, possibilitando redução na emissão de gases para a atmosfera, é necessária a utilização desses mesmos recursos, mesmo que indiretamente, para a demanda tecnológica utilizada em sua produção.

O balanço energético na fabricação do etanol é o somatório da energia utilizada no cultivo da matéria-prima e no setor industrial da produção. Além disso, também é avaliada a energia proveniente do produto final e dos coprodutos gerados. Em outras palavras, são contabilizadas quantas unidades de energia renovável são produzidas através de uma unidade de energia fóssil (EPLCA, 2007).

Os produtores de milho empregam materiais energéticos como gasolina, diesel, gás natural, gás liquefeito de petróleo e eletricidade diretamente no plantio, colheita e secagem das plantas. Também há energia considerável requerida na utilização de fertilizantes para crescimento da matéria-prima. (ECONOMIC RESEARCH SERVICE (ERS),2014)

Assim, na indústria de etanol de milho, a sustentabilidade do processo leva em consideração a proporção de energia disponível em certa quantidade de etanol e matéria-prima em relação à energia externa necessária para produzir o milho e transportar matérias (PIMENTEL,2007), como demonstrado na Figura 20. Com esse balanço energético, a indústria vem tentando aprimorar suas tecnologias de forma que o saldo energético seja o maior possível (SHAPOURI et al, 2010).

Figura 20 – Fluxo de energia do sistema de produção de etanol de milho



Fonte: Autoral.

As atividades que consomem energia na produção de etanol são descritas na Tabela 4 (OLIVEIRA, SERRA, OLIVEIRA, 2014)

Tabela 4 – Atividades consumidoras de energia na produção de etanol

| Setor agrícola | Setor Industrial |
|----------------------------------|---|
| Produção | Eletricidade |
| Transporte de matéria-prima | Mão de obra |
| Fertilizantes | Transporte entre as fases de produção |
| Transporte de máquinas agrícolas | Equipamentos |
| Mão de obra | Vapor (geração de calor) |
| | Edificações |
| | Transporte e produção de mercadorias e produtos |

Fonte: OLIVEIRA, SERRA, OLIVEIRA (2014).

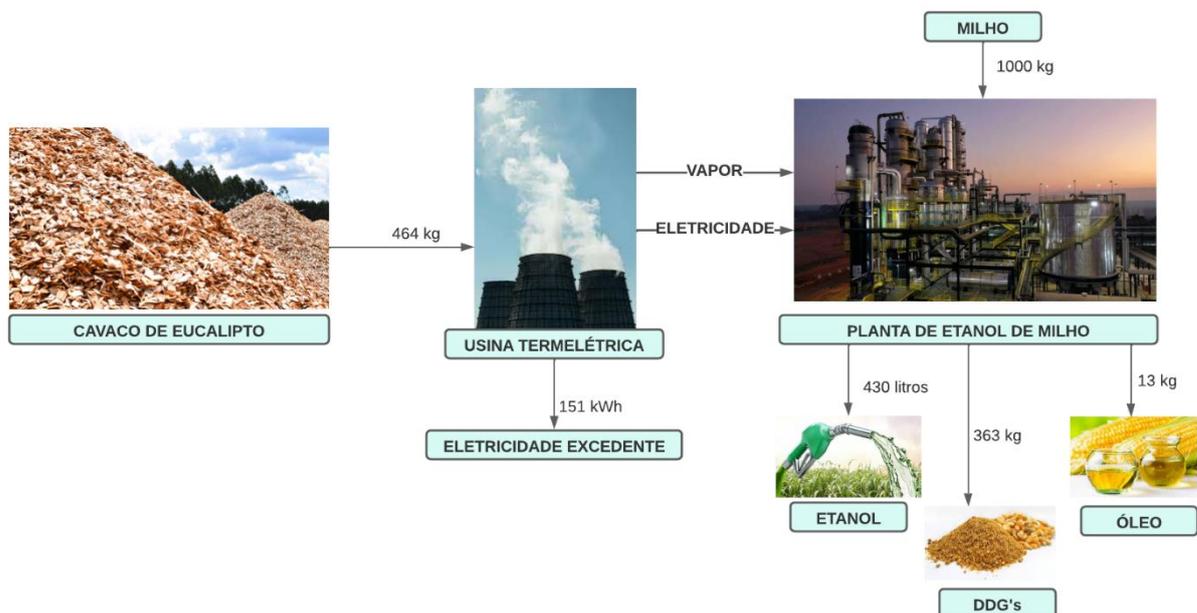
Para estudo das taxas de energia na produção do milho foram utilizados, principalmente, dados atualizados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e materiais disponibilizados pelas indústrias localizadas no Centro-oeste brasileiro. Essas informações

incluem a energia necessária para utilização das máquinas agrícolas, taxas de aplicação de fertilizantes, produtos químicos, entre outros.

Para o processo de fabricação do etanol de milho e dos coprodutos, a energia necessária de vapor e eletricidade é proveniente de termelétricas ou plantas de cogeração. Na região Centro-Oeste, por exemplo, o cavaco de eucalipto é utilizado como fonte pelas usinas. A vantagem desse sistema é que a eletricidade proveniente das termelétricas não é totalmente gasta no processo e por isso a energia excedente pode ser vendida.

Analisando dados operacionais da produção na região em questão (Figura 21), 1 tonelada de milho é capaz de produzir 430 litros de etanol, 363 quilos de DDGS e 13 quilos de óleo. Para isso, faz-se necessário o consumo de 464 kg de cavaco de eucalipto para atender a demanda de energia da usina, os quais ainda permitem exportar 151 kWh de eletricidade excedente (FS BIOENERGIA, 2018).

Figura 21 – Fluxo energético da FS Bioenergia



Fonte: Adaptado de FS Bioenergia

A Tabela 5 fornece resumo dos dados disponibilizados pela USDA em 2016 sobre os componentes totais de energia utilizados na produção de milho num intervalo de 5 anos entre os anos de 1991 e 2010. Para estimar os insumos gastos na produção da planta, a fonte empregada foi referente à Gestão de Recurso Agrícola (ARMS) norte-americana. Para melhor interpretação, as unidades foram convertidas do Sistema Internacional de Unidades (SI) para unidades utilizadas no Brasil.

Tabela 5 – Consumo energético de utilidades nos Estados Unidos na cultura do milho

| Fertilizantes | Unidade | 1991 | 1996 | 2001 | 2005 | 2010 |
|--------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Nitrogênio | kg/ha | 139,546 | 145,015 | 149,591 | 149,512 | 152,996 |
| Potássio | kg/ha | 59,147 | 66,410 | 99,217 | 68,663 | 61,501 |
| Fosfatos | kg/ha | 65,200 | 53,980 | 63,675 | 60,929 | 55,426 |
| Fontes de Energia | Unidade | 1991 | 1996 | 2001 | 2005 | 2010 |
| Gasolina | L/ha | 31,803 | 28,904 | 15,902 | 17,956 | 18,240 |
| Diesel | L/ha | 64,074 | 80,444 | 64,075 | 54,346 | 46,302 |
| Eletricidade | kWh/ha | 83,003 | 190,592 | 83,003 | 50,434 | 53,004 |

Fonte: USDA (2016)

Segundos dados do Embrapa (2006), o gasto de fertilizantes no Brasil é mostrado na Tabela 6 de acordo com a produtividade e disponibilidade.

Tabela 6 – Consumo energético de Fertilizantes no Brasil

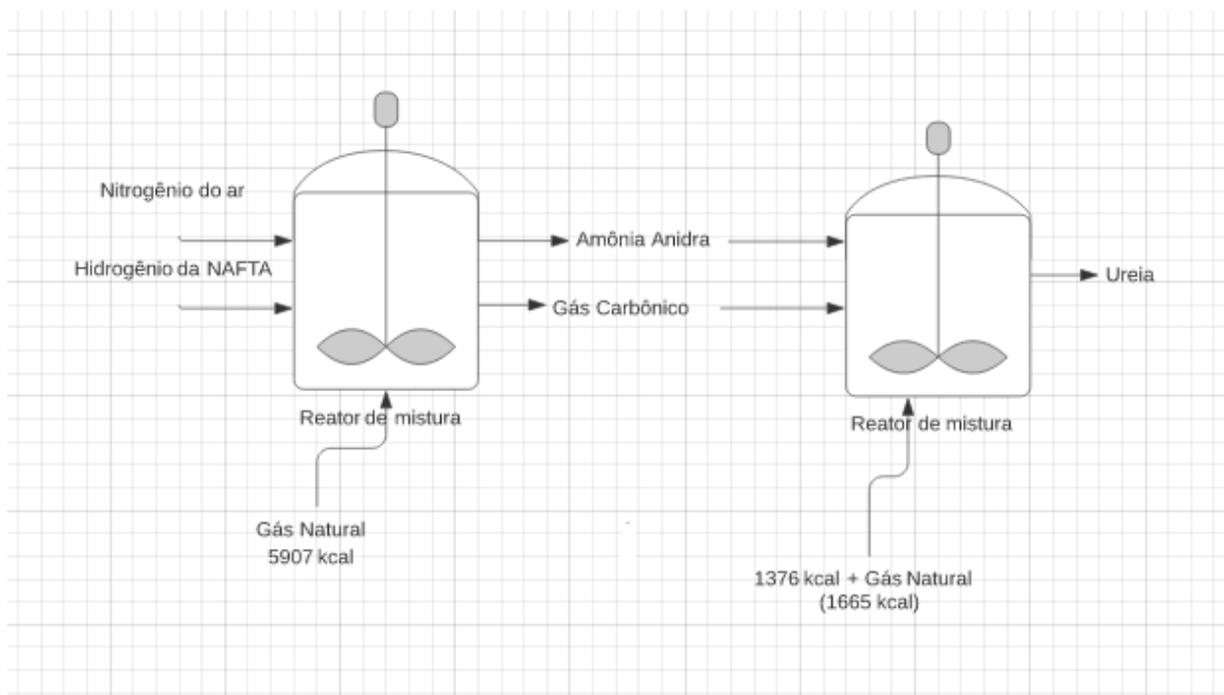
| Produtividade (t/ha) | Doses de Nitrogênio (kg/ha) | Doses de Potássio (kg/ha) | | | Doses de Fosfatos (kg/ha) | | |
|---------------------------------|--|----------------------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|--------------|-----------------|
| | | Disponibilidade | | | Disponibilidade | | |
| | | Baixa | Média | Adequada | Baixa | Média | Adequada |
| 4-6 | 60 | 50 | 40 | 20 | 80 | 60 | 30 |
| 6-8 | 100 | 70 | 60 | 40 | 100 | 80 | 50 |
| >8 | 140 | 90 | 80 | 60 | 120 | 100 | 100 |

Fonte: Adaptado de Infoteca

Como pode ser observado, os fertilizantes correspondem significativamente pelo consumo de energia em seu processo produtivo e seu consumo nos dois países analisados tem taxas similares. Essa relação entre fertilizantes e gasto energético é explicada pelo fato de que a agricultura passou a depender, em muito, de fatores e insumos externos. A dependência externa destes estabelecimentos, no sentido do aumento da produção e produtividade agrícola, modificaram a matriz energética que os sustentava. Em outras palavras, essa matriz energética, que caracterizava o modelo da agricultura convencional, baseou-se, na utilização de insumos que acelerassem e aumentassem a produção e os combustíveis fósseis são muito utilizados para produção de fertilizantes (NETTO E DIAS, 2020).

O principal fertilizante utilizado na cultura do milho é o nitrogênio, com gasto médio de 140 kg/ha. A utilização da adubação nitrogenada tem o objeto de obter maior rendimento de grãos. A quantidade já estimada também analisa redução de custos e que causem menor impacto sobre o ambiente. Dentre os fertilizantes nitrogenados disponíveis no mercado, os mais utilizados são ureia, nitrato de amônio e o sulfato de amônio (EQUIPE MAIS SOJA,2020). A produção de ureia juntamente ao seu gasto energético é ilustrada da Figura 22.

Figura 22 – Energia necessária para produção de ureia.



Fonte: Adaptado de Mendes e Carvalho (2015)

Em relação ao transporte, os sistemas de aquisição de milho e distribuição de etanol evoluíram de forma que as fazendas e os postos de armazenamento se aproximaram das usinas para realização de todo processo produtivo. Este fato contribui para que a região centro-oeste brasileira seja a maior produtora de etanol de milho do país, dado o fato que a cultura do milho é predominante na região. A modificação das distâncias percorridas pela indústria atual reduziram a estimativa do sistema de modelagem e uso de energia no transporte. Nos Estados Unidos, a estimativa para a energia utilizada no transporte é de 332 BTU/ton por milha (0,218 kJ/kg por km) para trens e 1175 BTU/ton por milha (0,770 kJ/kg por km) para caminhões (USDA,2016).

Em relação às máquinas agrícolas, o consumo energético é maior devido ao avanço tecnológico desses equipamentos. As estimativas de energia totalizam 601,904 BTU/acre por

ano (1.569,23 kJ/ha por ano) e estão relacionadas ao plantio, pulverização, colheita e armazenamento do milho (USDA,2016).

No que se refere à análise energética total da produção da matéria-prima por ano, diversos autores estimaram a quantidade de energia média requerida. Riquetti et al. (2012) verificaram um gasto médio de 12.050,33 MJ/ha na produção de grãos, Santos & Simon (2010) verificaram um gasto de 9.696,97 MJ/ha e Almeida et al. (2010) verificaram um gasto energético médio de 4.593,33 MJ/ha na produção de grãos. Melo et al. (2007) avaliaram o gasto energético em 2 anos consecutivos na mesma propriedade, na safra 2001/2002; o gasto foi de 11.270,23 MJ/ha, na safra 2002/2003. Fazendo uma média dos dados expostos pelos autores, o gasto energético total da produção anual é de 9402,715 MJ/ha.

O balanço energético do setor industrial não pode ser generalizado e depende da individualidade de cada empresa. Esse resultado varia de acordo com uma série de fatores, tais como política, economia, mercado consumidor, outros. Geralmente, esse balanço é afetado por um principal fator: utilização de energia convencional ao invés de energia proveniente da biomassa do milho. (USDA,2016)

Como já descrito, o etanol pode ser produzido a partir de matérias-primas que contenham amido ou açúcares. No caso das matérias-primas açucareiras, como a cana-de-açúcar, o açúcar disponível na biomassa é base para a produção do biocombustível (MANOCHIO, 2014).

A utilização da biomassa do milho como combustível substituiria a necessidade de combustível fóssil externo. Além disso, o carbono removido da atmosfera seria devolvido ao ar, pela queima da palha. O problema associado à essa substituição se refere ao aumento excessivo de gastos, associados à equipamentos e mão de obra (MUELLER, 2012). No Brasil, outro fator que impede a utilização da biomassa como combustível é o fato da produção da planta reutilizar a palha para fertilização do solo, sendo que a palha quando deixada no solo, diminui risco de erosão e umidade excessiva, favorecendo a próxima colheita (MANOCHIO,2014).

Alternativamente, os produtores de milho que usam energia de biomassa nos Estados Unidos, podem classificar sua produção como um biocombustível avançado, o que significa, menos gases poluentes emitidos na atmosfera, sob o Padrão de Combustíveis Renováveis, um status paralelo ao etanol a partir da cana (GALLAGHER, et al., 2013).

4.1.1. Comparativo do gasto energético para a produção de etanol de milho versus etanol de cana de açúcar

Fazendo a análise comparativa entre a cana-de-açúcar e o milho, a primeira demanda mais água e tempo em seu ciclo produtivo, mas é apontada como a fonte mais favorável para produção de etanol (MILANEZ et al., 2014), principalmente por conta de sua alta produtividade de biomassa e de biocombustível por hectare (SOUZA et al., 2013). A Tabela 7 aponta alguns desses aspectos.

Tabela 7 – Análise das matérias-primas usadas na produção de etanol

| | Sacarose de cana-de-açúcar | Sacarose de beterraba | Amido de milho | Materiais lignocelulósicos |
|---|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Ciclo de colheita (meses) | 12-18 | 5-11 | 4 | 10-12 |
| Necessidade de água (mm/ciclo de colheita) | 150-250 | 64,7-88,5 | 62,5-150 | 75-120 |

Fonte: Milanez,et.al. (2014)

A produtividade de álcool do etanol de milho ganha da cana-de-açúcar, de maneira que, como visto anteriormente, cada tonelada de milho rende média de 430 litros de etanol enquanto que o esmagamento da mesma quantidade de cana-de-açúcar produz, no máximo, 90 litros do biocombustível. Porém, em termos de etanol por unidade de área a cana-de-açúcar é muito mais produtiva que o milho. Para cada hectare de milho produzido, são gerados de 7,5 a 10 toneladas de álcool. No caso da cana, cada hectare produz de 60 a 120 toneladas de etanol. (BNDES; CGEE, 2008). No período de 2017 a 2019, a produção é analisada na Figura 23, na região centro-sul do Brasil.

Figura 23 – Produtividade do etanol em 2017 de acordo com a matéria-prima.



Fonte: Embrapa (2017) e Innovatech (2019).

A avaliação da eficiência de um biocombustível em termos energéticos toma como base o princípio de que todo material fabricado nas indústrias demanda certa quantidade de energia fóssil para ser produzida e a energia proveniente desse biocombustível deve ser maior que o teor consumido. Nesse panorama, quanto maior a eficiência de um produto, maior seu potencial útil nos setores em questão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). Essa eficiência é representada pela Equação 2 (EPLCA, 2007):

$$\eta = \frac{E_p}{E_c} \quad (2)$$

Em que: η : eficiência energética;
 E_p : Energia produzida;
 E_c : Energia consumida.

Assim, utilizando a Equação 2, foram obtidos dados comparativos na Tabela 10 entre os ciclos de vida do etanol produzido por meio da cana-de-açúcar e milho. Os dados foram coletados por diferentes fontes e datas. Para o milho foi calculada a média dos dados de 2016 da produção americana utilizando o processo de moagem a seco em três plantas diferentes pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Esses dados são expostos na Tabela 8:

Tabela 8 – Balanço energético da produção de etanol de milho

| Relação do balanço energético | (MJ/ha) |
|---|----------|
| Energia no setor de produção/transporte de milho | 9625,3 |
| Setor agroindustrial | 36427,33 |
| Energia contida no etanol produzido | 70000 |

Fonte: USDA (2016).

Para a cana-de-açúcar, os dados estão expostos na Tabela 9 e foram publicados em 2019 pelo Jornal de Biotecnologia e Biodiversidade.

Tabela 9 – Balanço energético da produção de etanol de cana-de-açúcar

| Relação do balanço energético | (MJ/ha) |
|--|----------|
| Energia no setor de produção/transporte de cana | 12329,70 |
| Setor agroindustrial | 2610,10 |
| Energia contida no etanol produzido | 120414,8 |

Fonte: Jornal de Biotecnologia e Biodiversidade (2019)

Tabela 10 – Ciclo de vida energético do etanol por diferentes matérias-primas

| | Milho | Cana-de-Açúcar |
|--|----------------|-----------------------|
| Consumo de energia (fase agrícola+ industrial) | 46052,63 MJ/ha | 14939,8 MJ/ha |
| Energia total produzida | 70000 MJ/ha | 120414,8 MJ/ha |
| Eficiência energética para a produção de etanol (η) | 1,52 | 8,06 |

Fonte: Elaborado com base em USDA (2016) e JBB (2019).

Através dos dados obtidos na Tabela 10 pode-se observar que a cana-de-açúcar produz etanol com menor gasto energético e possui maior produtividade relacionada à sua biomassa

em energia gerada por unidade de área. Assim, para cada unidade de energia fóssil consumida, são produzidas 8,06 unidades de energia renovável. No caso do milho esse valor cai para 1,52.

Fazendo uma análise mais detalhada, em 89,5 litros de etanol por tonelada de cana tem a geração de 383.394 kcal de energia pelo etanol e 79.160 kcal pela queima do bagaço, totalizando uma produtividade de 462.554 kcal de energia promovida pela biomassa. Os volumes gerados pelos bagaços têm aplicação principalmente na alimentação de caldeiras das próprias usinas, pois o vapor derivado da queima é convertido em energia (DONKE,2016).

Em um cenário geral, a produção de álcool proveniente da cana-de-açúcar apresenta uma série de vantagens em relação ao milho, sendo essas maior produção por área cultivada, maior eficiência do processo e maior velocidade de fermentação (SIGNORINI et. al.,2015). Entretanto, vale ressaltar que por se tratarem de cadeias de valor muito distintas, a simples comparação entre as produtividades das culturas não é suficiente para avaliar a atratividade dos negócios em todos os casos. É preciso levar em consideração fatores como o valor dos coprodutos, a totalidade dos custos de produção e a pausa da produção de álcool da cana-de-açúcar em épocas de maiores preços de mercado, devido ao período de entressafra.

A entressafra ocorre principalmente devido ao clima, uma vez que, a cana-de-açúcar tem a produção pausada por três ou quatro meses no ano em território brasileiro, entre os meses de dezembro e março, devido a uma maior concentração do período chuvoso. Outro fator relevante na entressafra, é o fato da cana não poder ser estocada, ao contrário do que ocorre com o milho (SILVA et. al.,2020), causando pausa da produção de etanol neste período.

Além disso, essa análise não leva em consideração uma importante evolução tecnológica: a integração do milho como matéria-prima complementar para produção de álcool nas atuais usinas denominadas usinas Flex ou Flex Full.

4.2. Usinas Flex

Desde o ano de 2016, a produção nacional de álcool de cana-de-açúcar apresenta problemas relacionados a limitação para estoque de matéria-prima vegetal e o aumento do preço do açúcar no mercado internacional. Esses fatores fizeram com que as políticas públicas apoiassem uma associação da produção de etanol de cana com etanol de milho das usinas de álcool da região centro-oeste para suprir a demanda de combustíveis no país (DONKE,2016)

As usinas Full de milho produzem apenas etanol proveniente do grão e utilizam cavaco de eucalipto para cogeração de energia no processo industrial, como o caso da FS-Bioenergia (NEVES et. al.,2021).

As chamadas usinas Flex utilizam o milho como complemento aos períodos de entressafra da cana-de-açúcar. Elas optam por instalar uma estrutura menor adjacente à planta atual de cana, para o uso e aproveitamento de equipamentos e sistemas. Assim, são capazes de proporcionar enormes ganhos de eficiência, gerando receitas através do aumento na produção de álcool durante todo o ano e geração de coprodutos com valor agregado (NEVES et. al.,2021). O sistema do tipo Flex não demanda maiores gastos energéticos no setor produtivo, uma vez que o bagaço da cana pode ser armazenado próximo às caldeiras e gera energia. Além disso, ocorre um aproveitamento de mão-de-obra, pois já estaria contabilizada na atual produção de álcool baseado em cana-de-açúcar. O único custo adicional relevante nessa análise seria a aquisição da matéria-prima (SIGNORINI et. al.,2015).

As usinas do tipo Flex Full produzem etanol de milho e cana-de-açúcar em paralelo e são muito parecidos com a metodologia anterior, com diferença na presença de equipamentos adicionais, específicos para o milho, que tornam a moagem do grão possível não apenas na entressafra, mas com sinergia no processamento da cana para produção de etanol de milho durante o ano todo (NEVES et. al.,2021).

Para a participação no setor produtivo de etanol de milho, o Brasil possuía, até o fim de 2019, dez fábricas flex e duas produções exclusivas (UNEM, 2020). O crescimento desse mercado tem motivações diversas, tais como a extensa atividade de cultura de milho em algumas regiões, principalmente na região central do país, a redução da taxa de juros na economia brasileira no final de 2016, que diminuiu o custo de investimento em plantas novas e antigas e boas perspectivas para o consumo de etanol carburante no País, resultante, em especial, do maior alinhamento do preço da gasolina às flutuações do mercado internacional de petróleo desde o fim de 2016 (UNEM,2020).

Até o ano de 2021, a distribuição das usinas são representadas na Figura 24.

Figura 24 – Usinas de etanol de milho no Brasil



Fonte: Neves et. al. (2021).

De maneira geral, as usinas de cana brasileiras operam entre 180 e 223 dias por ano, mantendo um período de entressafra próximo a 160 dias. Durante um ano-safra, as usinas ficam sem gerar produção em cerca de 40% do tempo. No período de entressafra, a cana-de-açúcar não pode ser processada, já que não é possível estocá-la. O milho possui algumas vantagens como matéria-prima como a capacidade de armazenamento em longos períodos, facilitando o transporte e a produção deste grão em regiões mais distantes da usina e a proporção de alguns subprodutos para complementar a receita, como os DDGS e extração de óleo vegetal (KIM et al., 2008).

4.3. Viabilidade econômica

No Brasil, alguns fatores provocaram a queda do valor de mercado dos biocombustíveis. No ano de 2008, a crise internacional afetou drasticamente o mercado desse produto por restrições de crédito e desde 2009, os investimentos em plantas diminuíram, além do fechamento de várias unidades de produção (DELGADO,2017). Além disso, no governo de Dilma Rousseff o petróleo teve uma queda de preço abaixo do seu valor de mercado, complicando a inclusão do etanol no setor de combustíveis (MARINHO,2016). Porém, no ano de 2022 devido ao aumento da gasolina, o etanol apresentou crescimento significativo.

Como visto na seção 4.1, os coeficientes técnicos da produção de etanol de milho apontam alta produtividade por tonelada processada, mas a baixa produção por hectare e esse fator limita o rendimento do grão para produção de etanol (SILVA et. al., 2020).

Entretanto, o Brasil demonstrou aumento significativo da qualidade tecnológica aplicada à cultura do milho, gerando oferta excessiva do grão. Esse fator aumentou as exportações relacionadas ao milho, mas com receita pouco atraente devido aos problemas logísticos relacionados a distância do setor produtivo e dos portos (CONAB,2019). Assim, com o excesso da produção de milho torna-se necessária uma alternativa que aproveite o potencial do grão e com o aumento do mercado de biocombustíveis, o etanol de milho surge como uma alternativa economicamente viável (LOPES et. al., 2016).

A expectativa é que ocorram mais investimentos na área para as plantas Flex, a ampliação das estruturas já existentes e novos empreendimentos, apesar de existirem poucas empresas que apostaram seus investimentos em plantas Full, cuja capacidade de moagem e produção são superiores à tecnologia Flex (UDOP,2019). Um estudo de viabilidade econômica realizado em 2017, com base no orçamento para etanol de milho nas usinas brasileiras, mostra que é necessário R\$ 31.605.597,87 para adotar um modelo de usina de etanol Flex-Fuel e o retorno sobre o valor é obtido em um período médio de 3 anos (PEREIRA,2017).

No caso do milho, deve-se observar que o Capital Expenditure (Capex) colocado na estrutura integrada (Usinas Flex) é relativamente baixo. Dos investimentos realizados em projetos de planta flex, o Capex médio foi de R\$ 0,77/L*ano, enquanto nas plantas full o valor saltou para R\$ 1,68/L*ano. Uma das razões para isso é o fato de o etanol de milho poder ser produzido com investimentos adicionais à estrutura já existente. Ao contrário da cana-de-açúcar, o milho pode ser estocado, o que reduz a variabilidade sazonal do fornecimento de matéria-prima para a produção de etanol, além de abrir espaço para a precificação e sua aquisição pelas usinas em operações em mercados futuros. Além disso, as usinas flex podem produzir o etanol na entressafra da cana-de-açúcar, potencialmente combinando o baixo custo de aquisição do milho com elevados preços de venda do etanol (PEREIRA,2017).

Durante a safra de 2018/2019, o custo total da produção de etanol de milho em usinas Flex foi R\$1.709,07 para cada metro cúbico. Esse valor corresponde a 4,49% a menos que o custo das usinas que operam com etanol de cana, com valor de R\$1.789,40 por metro cúbico. Além disso, o milho foi avaliado a R\$1.243,51 por metro cúbico de etanol produzido e a cana-de-açúcar com valor 11% maior, de R\$1.404,08 por metro cúbico. Conseqüentemente, a margem de lucro para produção de etanol de milho foi de 23,9%, e para etanol de cana-de-açúcar 19,41% no mesmo período (SNA,2020).

O estado do Mato Grosso mais uma vez possui vantagens para instalação de usinas flex (UDOP,2019). Como o consumo de milho é baixo no mercado nacional, cerca de 13% da produção total, o grão é ofertado a um preço baixo para produção do etanol e DDGS destinados à alimentação animal no processo de moagem seca (UDOP,2019).

No estudo de duas usinas brasileiras que utilizam o modelo Flex, o nível de utilização da capacidade instalada na safra de 2018/2019 foi de 95,57% (SILVA et. al., 2020), enquanto nas usinas de cana-de-açúcar o índice obtido pelo Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas (PECEGE) realizado junto a 88 usinas, ficou em 81%. A tonelada de milho produziu aproximadamente 399 litros de etanol, 111 kg de DDGS, 113 kg de WDGS e 14 litros de óleo bruto (SILVA et. al., 2020).

Em relação aos custos de operação do processamento industrial, que representa em média 19% do custo do etanol, o valor de produção do milho é 40% maior que o de cana-de-açúcar. A razão para a diferença está no fato de que os açúcares da cana-de-açúcar estão disponíveis na biomassa, sendo necessário apenas um processo de extração destes para a produção de etanol. O milho, como visto, necessita da conversão do amido em açúcares através de um processo enzimático a altas temperaturas decorrente da insolubilidade dos polissacarídeos (SILVA et. al., 2020).

Em pesquisa realizada por MARTINS (2018), o custo da instalação de uma Usina Full de milho é de R\$ 409.290.270,97. Nesse mesmo cenário, o custo de produção foi avaliado em R\$ 109.700.896,92/ano. O fluxo de caixa da planta é negativo até o 17º ano de operação, ou seja, a operação só se torna economicamente lucrativa após 16 anos, com receita anual de aproximadamente R\$80.000.000,00.

Em pesquisa realizada por em Xavier et al. (2009) e pelo Pecege (2013) foi feita uma análise comparativa de custos e rentabilidade da produção de etanol por meio de 5 casos. O projeto completo é levado em consideração, sendo assim, o valor da instalação da usina de cana já existente entra nos cálculos para que o custo total seja obtido com melhor precisão. Na produção de etanol de milho o custo das enzimas, do cavaco e da produção dos coprodutos foram consideradas.

Assim, as tabelas comparativas referentes aos casos 1,2,3,4 e 5 foram obtidas.

- Caso 1: Indústria básica produtora de etanol de cana-de-açúcar.

Tabela 11 – Caso 1

| Cenário | Investimento Básico (R\$ milhões) |
|----------------|--|
| Milho | 0 |
| Cana-de-açúcar | 405 |
| Total | 405 |

- Caso 2: Usina Flex em que ocorre processamento de 625 t cana/h em caldeira a 22 bar e sem venda de energia elétrica. O milho é moído a seco e os sólidos obtidos na fermentação são retirados. Uso de cavaco como fonte de energia complementar. Sem produção de DDGS.

Tabela 12 – Caso 2

| Cenário | Investimento Básico (R\$ milhões) |
|---------------------------|--|
| Milho | 100 |
| Cana-de-açúcar | 405 |
| Investimento total | 505 |

Fonte: Adaptado de Pecege 2013

- Caso 3: Indústria otimizada produtora de cana-de-açúcar.
A diferença entre custos nos casos 1 e 3 ocorre em função do investimento para uma usina de cana-de-açúcar básica comparada com usina de alta produtividade na cogeração e tecnologia mais avançada. A tecnologia básica representa o modelo das usinas de cana-de-açúcar construídas durante o Proálcool e que continuam em operação e otimizados que buscam representar as usinas modernas, com tecnologia atual e venda de excedente de energia elétrica. (XAVIER et al.,2009).

Tabela 13 – Caso 3

| Cenário | Investimento Básico (R\$ milhões) |
|---------------------------|--|
| Milho | 0 |
| Cana-de-açúcar | 585 |
| Investimento total | 585 |

Fonte: Adaptado de Pecege 2013

- Caso 4: Usina flex em que ocorre processamento de 625 t cana/h em caldeira a 65 bar, com venda de energia elétrica e otimização energética. O milho é moído a seco e os sólidos são retirados na etapa de fermentação, com produção de DDGS e reciclo de células.

Tabela 14 – Caso 4

| Cenário | Investimento Básico (R\$ milhões) |
|---------------------------|--|
| Milho | 130 |
| Cana-de-açúcar | 585 |
| Investimento total | 715 |

Fonte: Adaptado de Pecege 2013

- Caso 5: Usina Flex full em que ocorre processamento de 625 t cana/h em caldeira a 65 bar, com venda de energia elétrica e otimização energética. O milho é moído a seco e os sólidos são retirados na etapa de fermentação, com produção de DDGS.

Tabela 15 – Caso 5

| Cenário | Investimento Básico (R\$ milhões) |
|---------------------------|--|
| Milho | 205 |
| Cana-de-açúcar | 585 |
| Investimento total | 790 |

Fonte: Adaptado de Pecege 2013

As receitas geradas nos casos 1 a 5 ocorrem em um período aproximado de 4 anos e são expostas na Tabela 16 (PECEGE,2013), porém não é especificado em quantos anos as usinas passam a ter retorno positivo. Destaca-se, novamente, que todos os casos consideraram iguais escalas de capacidade de processamento industrial de cana-de-açúcar. Dessa forma, todos os resultados, medidos em valores absolutos, são perfeitamente comparáveis entre si (PECEGE,2013).

Tabela 16 – Receitas geradas

| Cenários | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Receita da produção (milhões R\$) | 326,9 | 408,3 | 359,6 | 536,4 | 678,5 |
| Receita de etanol (milhões R\$) | 321 | 393,6 | 321 | 480 | 577,6 |
| Receita de coprodutos ou eletricidade (milhões R\$) | 5,9 | 14,7 | 38,7 | 56,4 | 100,9 |

Fonte: Adaptado de Pecege 2013

Com os resultados obtidos é possível analisar o expressivo aumento da rentabilidade das indústrias que utilizam o milho como matéria-prima auxiliar à cana-de-açúcar. No caso 2, por exemplo, a receita é 19,94% superior à do caso 1 em função de um investimento 19,8% maior no Capex da indústria. Os investimentos apresentam valores mais altos quanto a indústria opera com a produção de coprodutos (casos 4 e 5) que geram uma receita de um terço do valor obtido pelo etanol. Além disso, os coprodutos possuem receitas maiores quando comparadas a geração de energia excedente da cana-de-açúcar.

Outro ponto importante analisado, é que as usinas otimizadas que produzem etanol por meio da cana (Caso 3) custam R\$80 milhões a mais que as usinas Flex simples (Caso 2) ou 13,67% de aumento. A receita do Caso 2 é superior em R\$48,7 milhões ou 11,93%.

As usinas flex que produzem coprodutos exigem um investimento adicional de R\$30 milhões relacionado a operação com milho, comparando os casos 2 e 4. Como o Caso 4 utilizou uma indústria otimizada de cana-de-açúcar, o investimento do setor canavial foi R\$180 milhões a mais que o valor exigido por uma indústria básica (casos 1 e 2). Dessa forma, o investimento total requerido no caso 4 foi superior ao investimento do caso 2 em 29,37%, mas o aumento relacionado a produção de coprodutos do milho é responsável por somente 4,20% desse aumento.

Além disso, a receita gerada pela venda de energia excedente proveniente da cana no caso 4 é de R\$11,3 milhões e a venda energia excedente proveniente do cavaco na produção de etanol de milho foi de R\$6,3 milhões (PRECEGE,2013). Dessa forma, a venda de coprodutos

gerou uma renda de R\$38,9 milhões. Como já descrito, a usina flex opera utilizando o milho apenas na entressafra da cana, e durante o período de funcionamento (aproximadamente 4 meses por ano), gera uma receita que supera o valor do que é gerado pela venda de energia na produção de etanol de cana no caso 3 por todo ano, representando uma expressiva margem de lucro. Pode-se dizer também, que o lucro gerado pelo milho com a venda de excedentes é superior a venda de excedentes da cana em 80,14%.

O caso 5 reflete que o aumento do valor da produção do etanol de milho em uma usina flex full é de R\$75 milhões em comparação com o caso 4 e que a rentabilidade nessa operação aumenta em R\$97,7 milhões, onde a venda de coprodutos é responsável por R\$83,6 milhões. Dessa forma, é possível observar a importância da produção de coprodutos, de forma que a renda gerada pela venda de etanol da cana numa usina flex full é de R\$321 milhões e a renda proveniente do mercado de etanol de milho é de R\$256,7 milhões (20,03% a menos), considerando que a produção ocorre em paralelo durante todo o ano (PRECEGE,2013).

Vale ressaltar que análises relacionadas ao custo de operação das usinas são muito dependentes de premissas permeadas por alta incerteza, como o preço de aquisição das matérias-primas e outros suprimentos utilizados na produção, preço da energia elétrica, impostos, outros e por isso não foram abordados.

De maneira geral, analisando o custo de instalação das usinas e a receita gerada as análises demonstram que uma usina flex pode ser uma promissora alternativa para garantir rentabilidade da produção de etanol, especialmente em um contexto de pressão crescente de custos nessa atividade.

Se considerados os cenários de melhor viabilidade, seria possível agregar cerca de 2,7 bilhões de litros de etanol com a implementação de usinas flex, o que equivale a 10% da produção atual. O mesmo esforço de crescimento exigiria, pelo menos, 11 novas usinas de cana-de-açúcar, cada uma com capacidade de três milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, o que demandaria, aumento de 413 mil hectares de novos canaviais em, no mínimo, quatro anos. (BNDES,2020).

4.4. Viabilidade ambiental

Os combustíveis de origem fóssil, tais como diesel e gasolina são abundantemente utilizados nos setores de transporte no mundo, além de também serem empregados na agricultura, comércio, setores de construção civil e industrial para geração de energia elétrica ou mecânica (TIRADO et al., 2010). O alto consumo dessas fontes, causou a intensa emissão

de Gases de Efeito Estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e gases halogenados que possuem características radioativas, cujo aumento descontrolado na atmosfera provoca o fenômeno do aquecimento global (UNEP, 1996). Além disso, o uso desses combustíveis trouxe também problemas sociais como secas e escassez de água, o que também tem efeito em questões de segurança alimentar e desnutrição (TIRADO et al., 2010).

Nesse contexto, os biocombustíveis são identificados como uma solução potencial por terem origem via fontes renováveis, com risco ambiental e à saúde insignificantes, se bem gerenciados (LIEW et al., 2014). Porém, apesar dos benefícios comprovados por estudos científicos, a produção de biocombustíveis vem acompanhada de críticas e debates internacionais ao longo dos anos (TIRADO et al., 2010). Medidas estão sendo adotadas em nível internacional para diminuir os potenciais riscos dos efeitos induzidos indesejáveis desses biocombustíveis com a adoção de práticas mais sustentáveis nas abordagens de avaliação de gerenciamento de risco na Diretiva Europeia 2009/28/EC – RED II, CORSIA (Carbon offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) e RenovaBio (ANP, 2021).

Em relação às emissões de GEE, os benefícios que acompanham a utilização de etanol estão atrelados ao balanço energético da produção geral, pois dependem do consumo de combustíveis fósseis utilizados em sua produção. O balanço de GEE é obtido de forma a contabilizar o teor dos gases emitidos no ciclo de vida desse biocombustível.

Nesse cenário, a avaliação do ciclo de vida possibilita a classificação do desempenho ambiental de um produto na identificação dos estágios que mais contribuem para um impacto e também possibilita a incorporação de questões ambientais ao projeto e desenvolvimento da planta (ISO, 2006).

Em todo o ciclo de vida do etanol, são emitidos de 578 a 771 kg de CO₂ por tonelada de produto (BNDES, 2020).

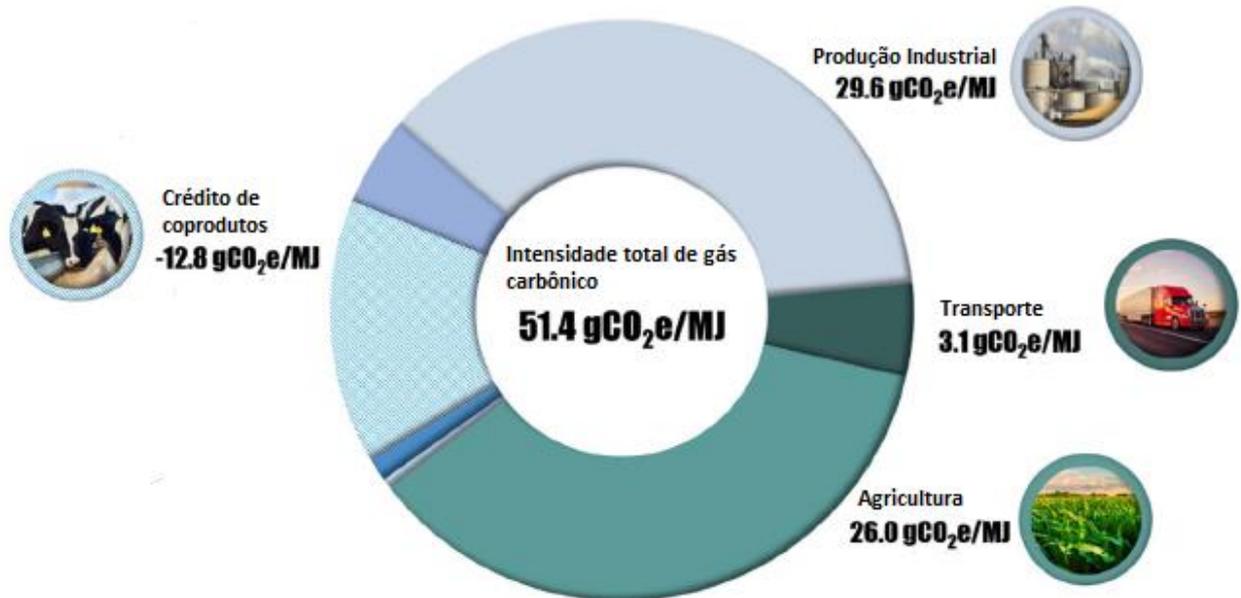
Segundo estudo emitido pelas instituições governamentais americanas, como California Air Resources Board (CARB), EPA e USDA e publicado por Scully et. al. 2021 as emissões de carbono nos setores de produção do etanol de milho estão dispostas na Figura 25.

A estimativa das emissões de CO₂ no setor industrial de produção de etanol de milho é em média de 29,6 gramas de CO₂ emitidas por MJ de energia gasta e no setor de produção agrícola esse valor corresponde a 26g CO_{2e}/MJ. As emissões de GEE associados à produção de dependem dos tipos de moagem usados para fazer etanol a partir de milho, a intensidade de uso de energia desses processos, e as fontes e os tipos de combustível usados para fornecer

potência. Na moagem seca, o combustível primário do processo é o gás natural, com uma participação de 72,5% a 100% da energia do combustível de processo (SCULLY et. al. 2021).

Em relação aos transportes, o balanço avaliado consiste em emissões associadas com a queima de gasolina e diesel durante o transporte de milho da fazenda para a refinaria de etanol e da refinaria ao posto de varejo. Vale ressaltar que o CO₂ liberado na produção é também utilizado para o processo de produção de coprodutos, o que reduz as emissões num contexto geral, gerando assim, um crédito ao balanço energético total (SCULLY ET. AL. 2021). Os demais gastos são associados a tratamentos prévios da terra.

Figura 25 – Emissões de CO₂ na produção de etanol de milho nos Estados Unidos



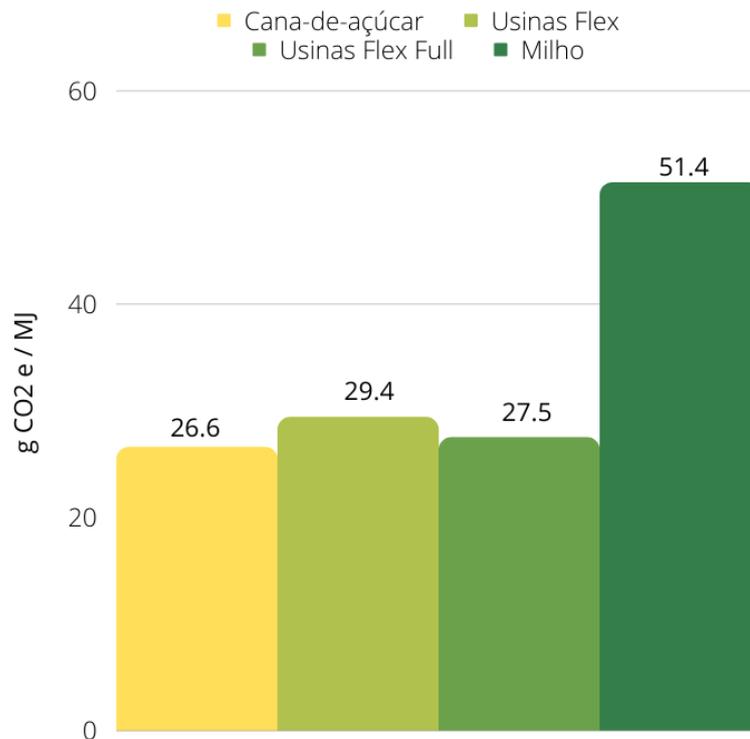
Fonte: Adaptado de Scully (2021).

Segundo EPA (2019), o etanol de milho reduz as emissões de GEE em apenas 21% e o etanol de cana-de-açúcar reduz tais emissões em 61%, quando comparados à combustíveis fósseis, o que caracteriza a cana como matéria-prima de biocombustível avançado devido ao fato de que a premissa de substituir combustíveis fósseis em prol do meio ambiente é realmente alcançada.

Essa é a maior problemática envolvendo a produção de etanol de milho. Neste sentido, o governo do presidente Joe Biden está revisando as políticas sobre biocombustíveis nos Estados Unidos como parte de um esforço mais amplo para descarbonizar a economia dos EUA até 2050, para combater as mudanças climáticas relacionadas à produção de etanol de milho (G1,2022).

Fazendo uma análise comparativa nas emissões de GEE para usinas full de cana-de-açúcar, usinas flex, usinas flex full e usinas full de milho, os resultados são obtidos na Figura 26 (BNDES,2020), (SCULLY et. al. 2021).

Figura 26 – Emissões de gases de efeito estufa para a produção de 1 MJ de etanol hidratado para os diferentes cenários industriais



Fonte: Adaptado de BNDES (2020) e Scully et. Al (2021)

Pela Figura 26, o cenário correspondente a usinas dedicadas exclusivamente ao processamento de cana-de-açúcar foram as que geraram menores quantidades de GEE, sendo o menos impactante ao meio ambiente. Os principais fatores que influenciaram as emissões de GEE foram a inclusão do milho no sistema, a quantidade de milho processada e o rendimento industrial de produção de etanol de milho. Além disso, as indústrias flex apresentam um desempenho relativamente menor quando comparadas às usinas flex full, mesmo processando menor quantidade de milho, o que pode ser explicado pelo fato das emissões relacionadas ao milho estarem voltadas principalmente para o setor agrícola e não no setor de produção. (BNDES,2020).

Uma explicação desses resultados, considerando-se todos os processos do ciclo de vida do etanol, é em relação ao uso de fertilizantes que possuem intensa contribuição para as emissões de GEE. Para a produção exclusiva de etanol de cana-de-açúcar, bem como para o que considera o processamento de uma quantidade reduzida de milho essas emissões são menores, considerando que a cana demanda menor tratamento do solo. O milho ingressa em

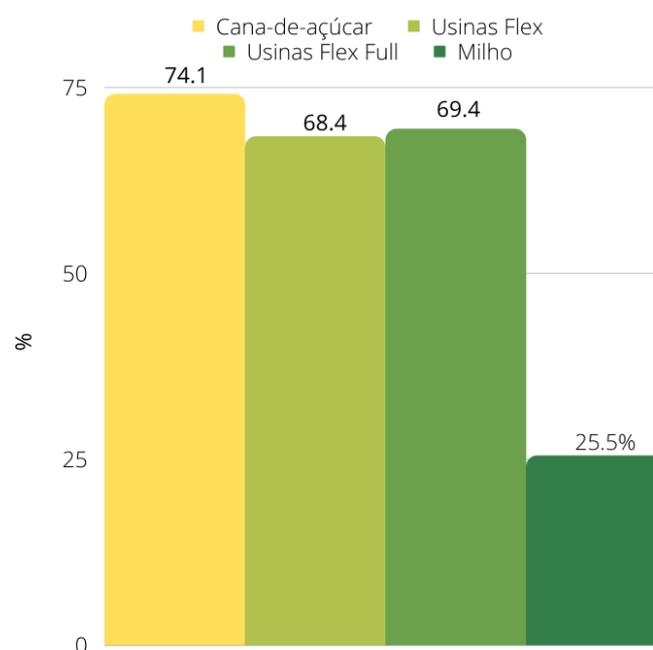
elevadas quantidades de demanda por fertilizantes, como já discutido. O nitrogênio, por exemplo, resulta na emissão de óxido nitroso (N₂O), que tem potencial de efeito estufa 298 vezes maior que o do gás carbônico (CO₂) (IPCC,2006).

Vale ressaltar que, no cenário agrícola para a cana-de-açúcar avaliado nos dados disponíveis no gráfico da Figura 26 pelo BNDES, não são consideradas queimadas pré-colheita, nem mudanças no uso da terra (potenciais geradores de emissões de GEE) em função da produção (BNDES,2020).

Além disso, é necessário pontuar que o etanol produzido pelas usinas flex e flex full, apesar de apresentarem emissões de GEE maiores que os de etanol somente de cana, seria consideradas avançadas, o que lhe atribui grande potencial para serem usadas como alternativa aos combustíveis fósseis em diversos países, considerando que ocorre redução das emissões quando comparadas, por exemplo, à gasolina. Biocombustíveis avançados são aqueles que realmente atendem a uma emissão reduzida de GEE, com percentual superior a 50% de redução comparada a combustíveis fósseis (UDOP,2019).

Analisando a Figura 25, o etanol obtido nas usinas flex, nos cenários propostos para a realidade brasileira, é capaz de promover reduções maiores que as obtidas pelo etanol de milho norte-mericano, que variam de 19% a 37% (WANG et. al., 2012). A Figura 27 esboça o percentual de redução das emissões de gases do efeito estufa para cada cenário comparado à gasolina (BNDES,2020).

Figura 27 – Redução do percentual de emissão de GEE comparado à gasolina



Fonte: Adaptado de BNDES (2020)

5. CONCLUSÃO

O crescimento da demanda por combustíveis, relacionada principalmente ao aumento da frota de veículos no Brasil, tem trazido monotonia de investimentos na produção de etanol, o que se traduz em importações crescentes de gasolina. Mas esse cenário está prestes a mudar, pelo fato de que, no ano de 2022 o preço da gasolina atingiu valor máximo no mercado comparado aos últimos dez anos, o que se traduz a um aumento do consumo de álcool e da participação efetiva de etanol no país nesse período e no próximo ano pelo fato de que o consumo de etanol é mais vantajoso na maioria dos estados.

Ao mesmo tempo, a safra de milho brasileira tem obtido crescimento significativo, sobretudo pelo aumento do plantio do grão, o que vem gerando pressão sobre seus preços, sobretudo nos estados do Centro-Oeste. Dessa forma, fazendo uma análise geral, a produção excessiva dos grãos gera uma oportunidade para utilização no mercado interno na produção de etanol.

Na avaliação do consumo energético e produtividade, a cana-de-açúcar possui vantagens pelo fato de que sua biomassa rende uma quantidade maior de álcool por hectare no setor de agricultura, além de ter energia excedente no processo levando a uma menor demanda de energia fóssil. Entretanto, essa produtividade é interrompida no período da entressafra, que tem duração em aproximadamente 4 meses por ano. O milho demanda menor consumo de água e menor ciclo de colheita. Além disso é importante destacar o potencial do grão em ser estocado e a produção excedente de milho no país, o que o agrega como alternativa para produção de etanol.

Pelo lado econômico, o milho gera rentabilidade em todos os cenários em que é utilizado como suplemento da cana, principalmente relacionadas à sua receita agregada, devido a venda de coprodutos. O investimento para implantar as indústrias flex são menores que a otimização de uma usina voltada exclusivamente para a cana-de-açúcar.

Do ponto de vista ambiental, a utilização de etanol reduz emissões de gases que causam o efeito estufa em todos os cenários avaliados, sendo assim, sua utilização é menos prejudicial se comparada, por exemplo, à gasolina. Mas o milho gera questionamentos principalmente no mercado americano, devido ao fato de que a redução da emissão é mínima não sendo possível classificá-lo como avançado. O etanol de cana-de-açúcar possui melhor desempenho nessa análise, em que a redução é entre 61 e 74%. Mas o etanol obtido nas usinas flex e flex full ainda pode ser considerado “biocombustível avançado”, mesma categoria do etanol de cana-de-açúcar, o que implica que a implementação dessa tecnologia é favorável para o meio ambiente.

Sendo assim, as usinas flex ou flex full se destacam como uma promissora alternativa na produção de biocombustíveis. Como em termos de investimento e aproveitamento de equipamentos e mão de obra as usinas flex tem maiores vantagens, essa metodologia é a melhor alternativa para um cenário geral, além de que, no cenário ambiental, essa diferença não é tão expressiva. Portanto, em razão dos méritos ambientais, econômicos e estratégicos avaliados neste trabalho, é oportuno que se avalie a criação de mecanismos que promovam os investimentos em usinas flex no Brasil e, com isso, se construa uma solução, tanto para a urgente necessidade de aumentar a produção interna de etanol quanto para a viabilização sustentável do crescimento da oferta de milho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMILHO. **Brasil:** estimativa de consumo por segmento. [Apucarana], 2006. Disponível em: [http:// www.abimilho.com.br/estatistica4.htm](http://www.abimilho.com.br/estatistica4.htm). Acesso em: 06 abr. 2022.

AEHLE, Wolfgang. **Enzymes in Industry:** Production and Applications. 3ed. ed. rev. Países Baixos: WILEY-VCH, 2007. 517 p. ISBN 978-3-527-31689-2.

APAR, Dilek Kiliç.; ÖZBEK, Belma. **Alfa-Amylase inactivation during corn starch hydrolysis process.** Process Biochemistry, V 39, n. 12, p. 1877-1892, 2004. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.014>

ARMS Staff, “Weekly Distillers Grains Summary,” USDA-Market News, NW_GR115, Des Moines, Iowa, Fri, Aug 21, 2015, http://www.ams.usda.gov/mnreports/nw_gr115.txt, accessed 10/03/2022.

A. T.; SAGLIETTI, J. R. C.; BUENO, O. C.; CAMPOS, A. T.; KLOSOWSKI, E. S.; GASPARINO, E. **Balanco energético na produção de feno de alfafa em sistema intensivo de produção de leite.** Ciência Rural, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 245-251, 2004

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável.** 1 ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2008. 314 p. ISBN 9788587545244

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BRASIL). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2020. **A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política.** Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2020. ISBN 9788587545244.

BON, Elba P. S.; FERRARA, Maria Antonieta; CORVO, Maria Luisa. **Enzimas em biotecnologia:** produção, aplicações e mercado. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2008.

BRUCE, S.D.; RODNEY, J.B.; NANCY, N.N.; COTTA, M.A. **The U.S. corn ethanol industry:** An overview of current technology and future prospects. USDA-ARS, National

Center for Agricultural Utilization Research, 1815 N. University Street, Peoria, IL, USA. 2008.

CAI, Canhui; ZHAO, Lingxiao; HUANG, Jun; CHEN, Yifang; WEI, Cunxu. **Morphology, structure and gelatinization properties of heterogeneous starch granules from high-amylose maize**. *Carbohydrate Polymers*. v. 102, p. 606-614, Feb/2014. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.010>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861713012241>. Acesso em: 28 mar. 2022.

CAMPOS, A. T.; SAGLIETTI, J. R. C.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O. C. **Análise energética na produção de feno de *Cynodondactylon* (L.) Pers.** *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 25, n. 2, p. 349-358, 2005.

CARDONA, C. A. e SÁNCHEZ, Ó. J. **Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks**. *Bioresource Technology*, v.99, n.13, p.5270-5295. 2007.

CEREDA, Marney Pascoli; VILPOUX, Olivier Francois. **Propriedades gerais do amido**. São Paulo: Fundação Cargill, 2003. V.1, 711p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2017. p. 1–160. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/1309_e50ecf243ee7243e60da214f4dfdef3. Acesso em: 22 mar 2022

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Diagnóstico da produção de etanol em Mato Grosso: binômio cana-de-açúcar/milho**. Cuiabá, 2018. (Compêndio de Estudos Conab, v.17).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**. 2019. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/25774_f7f98ca710bc573075b0b3e7f6adf973. Acesso em: 22 mar. 2022

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar**. Safra 2020/21, v. 7 – Primeiro levantamento, Brasília: Conab, maio 2020.

62p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 26 mar. 2022.

COSTA, Marcelo Augusto de Souza. **Efeito do sistema de fermentação, da adição de etanol ao tratamento ácido e da contaminação por *Lactobacillus sp* na produção de etanol**. Orientadora: Dra. Sandra Regina Ceccato Antonini. 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017. Disponível em:

<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9342/DissMASC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 mar. 2022.

CHEGG. **Questionário**. Disponível em: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/co2-process-making-ethanol-starts-fresh-water-4-recycled-enzymes-mash-cooling-jet-cooker-w-q38127278> Acesso em: 28 mar. 2022

CRUZ, J. C. PEREIRA FILHO, I. A. ALVARENGA, R. CONTIJO NETO, M. M. VIANA, J. H. M. OLIVEIRA, M. D. SANTANA, D. P. **Manejo da cultura do milho em sistema plantio direto**. Informe agropecuário, 27. Belo Horizonte, 2006.

DELGADO F, ROITMAN T, SOUSA ME. **Cadernos: biocombustíveis**. FGV Energia; 2017. Disponível em: <http://www.fgv.br/fgvenergia/caderno-biocombustivel/files/assets/common/downloads/CADERNO%20BIOCOMBUSTIVEL.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2022

DOLABELLA, R.H.C. **Biocombustíveis na Argentina: políticas públicas e evolução recente**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2011

DR-Dinheiro Rural. **A hora e a vez do milho**. 2019. Disponível em: <https://www.dinheirorural.com.br/a-hora-e-a-vez-do-milho/>. Acesso em: 27 mar. 2022.

EC - EUROPEAN COMMISSION. **EU agricultural outlook for markets and income, 2019-2030**. European Commission, DG Agriculture and Rural Development, Brussels. 2019. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/farming/documents/agricultural-outlook-2019-report_en.pdf. Acesso em: 26 de mar. de 2022.

EKHOF, S.R., WATSON, S.A. **Starch: Chemistry and Technology**. Third Edition, 2003- Academic Press, United States, p. 373-430

EPLCA, European Platform on Life Cycle Assessment. **Carbon Footprint: What it is and how to measure it**. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Italy, 2007.

ERS Staff. **ARMS Farm Financial and Crop Production Practices**. Disponível em: <http://ers.usda.gov/data-products/arms-farm-financial-and-crop-production-practices/tailored-reports-crop-production-practices.aspx>. Acesso em: 01 mar. 2022

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. U.S. **Bioenergy Statistics**. Disponível em: <https://data.ers.usda.gov/FEED-GRAINS-custom-query.aspx> Acesso em: 15 mar. 2022.

Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Safra mundial de Milho 2018/19 – 12º levantamento do USDA**. 2019. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/attachment/file-20190415194851-boletim-milhoabril2019/>. Acesso em: 22 mar. 2022

FSBioenergia. Disponível em: <http://www.fsbioenergia.com.br/ptbr/noticia/entrevista-com-2a-usina-a-caminho-fs-bioenergia-quer-ajudar-produtor-demilho-em-productividade/5>. Acesso em: 20 mar. 2022

GAZETA. **Brasil precisará de 100 novas usinas de etanol até 2020**. 2013. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/economia/brasil-precisara-de-100-novas-usinas-de-etanol-ate-2020-0hnrkgmbqhmjgh66mkck5iz2/>. Acesso em: 22 mar 2022.

GERMANI, R. **Moagem**. In: CRUZ, J.C. (Ed.). **Árvore do conhecimento: milho**. Brasília: Embrapa, 2011. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/Abertura.html> Acesso em: 15 mar. 2022.

GONÇALVES JUNIOR, C.A. et al. **Um estudo das deliberações da Câmara Setorial do Açúcar e do Álcool, usando análise de correspondência**. Revista de Economia e Sociologia Rural, Piracicaba, v.47, n.1, p.183-210, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/resr/v47n1/v47n1a07.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2022. doi: 10.1590/S0103-20032009000100007.

GOTO, C. E.; BARBOSA, E. P.; KISTNER, L. C. L. ; GANDRA, R. F. ; ARRIAS, V. L.; PERALTA, R. M. **Production of amylases by *Aspergillus fumigatus***. Revista de Microbiologia, v.29, p.99-103, 1998.

GRIPPA, Mario José Cacho. **Planta flex no mato grosso**. Orientador: Prof. Dr. João Padilha Júnior. 2012. 63 p. Trabalho de Conclusão Curso (Pós-Graduação 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: 12 mar. 2022.

GUZMÁN-MALDONADO, H.; PAREDES-LÓPEZ, O **Amylolytic enzymes and products derived from starch: A review**. Critical Reviews Food Science Nutrition, v. 35, p.373-403, 1995.

HELD, P. **Enzymatic Digestion of Polysaccharides**. BioTek Instruments. Vermont. 2012.

HERBARIO. Disponível em: <http://www.herbario.com.br/cie/1003amid.htm>. Acesso em: 28 mar. 2022

HERNANDEZ, D.I.M. **Efeitos da produção de etanol e biodiesel na produção agropecuária do Brasil**. 2008. 163f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) - Curso de Pós-graduação em Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Brasília, DF. Disponível em: <http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/1085/1/dissertacao2008DoraIsabelMHernandez.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2022.

INMETRO. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ**.

Disponível em

https://www.inmetro.gov.br/metcientifica/MCR/8314_etanol_combustivel.pdf. Acesso em: 17 mar. 2022.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Fourth Assessment Report: the physical science basis**. Genebra: IPCC, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ISO – INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **International Standard ISO 14040**: environmental management: life cycle assessment: principles and framework.

Genebra: ISO, 2006a. International Standard ISO 14044: environmental management: life cycle assessment: requirements and guidelines. Genebra: ISO, 2006b

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A.; SEKI, A. S.; BUENO, O. C. **Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 395-403, 2010.

KIM, Y.; MOSIER, N. S.; HENDRICKSON, R.; EZEJI, T.; BLASCHEK, H.; DIEN, B.; COTTA, M.; DALE, B.; LADISCH. **Composition of corn dry-grind ethanol byproducts: DDGS, wet cake, and thin stillage**. Bioresource Technology, Vol. 99, p. 5165-5176, 2008.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407007730?via%3Dihub>.

Acesso em: 27 mar. 2022

KLOPFENSTEIN, T.J., G.E. ERICKSON, V.R. BREMER. 2008. **Board-invited review: Use of distillers by-products in the beef cattle feeding industry**. J. Anim. Sci. 86:1223-1231.

LAJOLO, F.M.; MENEZES, E.W. **Carboidratos en alimentos regionales Iberoamericanos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008. 648p.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica**. 2. ed. São Paulo: SARVIER, 1995. p. 147-164 e 222-237

LIEW, W. H.; HASSIM, M. H.; NG, D. K. S. **Review of Evolution, Technology and Sustainability Assessments of Biofuel Production**. Journal of Cleaner Production, v. 71, p. 11–29, 2014.

LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugênio; BORZANI, Walter; SCHIMIDELL, Willibaldo. **Biotechnologia Industrial: Processos Fermentativos e Enzimáticos**. v.3. Ed. Edgar Blucher, Rio de Janeiro, 2001. ISBN 9788521202806

LOPES ML, PAULILLO SCL, GODOYA, CHERUBIM RA, LORENZI MS, GIOMETTI FHC, BERNARDINO CD, NETO HBA. **Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry**.. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1517838216310346> Acesso em: 27 mar. 2022

LOTTERMANN, M. T. **Purificação e caracterização estrutural de uma α -amilase de *Cryptococcus flavus* expressa em *Saccharomyces cerevisiae* “MFL”**. 2012. 92f. Dissertação Mestrado. Instituto de Ciências Biológicas. Universidade de Brasília, Brasília.

MALDONADO, Horácio Guzmán; LOPEZ, Octavio Paredes. **Amylolytic enzymes and products derived from starch: a review**. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v.35, n.5, p.373-403, 1995. DOI <https://doi.org/10.1080/10408399509527706>.

MARINHO AF. **Aproveitamento máximo do milho**. Canal Bioenergia; 2016. Disponível em: <http://www.canalbioenergia.com.br/aproveitamento-maximo-do-milho/> Acesso em: 22 mar 2022

MARTINS, C.F. **Descarte de grãos de milho: comparação das possíveis destinações e análise de custos para implantação de usina de produção de etanol**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos Orientadora: Profa Dra Gabriela Cantarelli Lopes. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/12820/TG_Carolina_revisa%cc%83o_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 30 mar. 2022

MENDES, A.A.J; CARVALHO, O.C.; **Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia**. 2015. *Revista Energia na Agricultura*. Disponível em : [file:///C:/Users/User/Downloads/600-Texto%20do%20artigo-8150-1-10-20160227%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/600-Texto%20do%20artigo-8150-1-10-20160227%20(1).pdf) Acesso em: 06 abr. 2022.

MOREIRA MMR, ARANTES SM. **Análise Socioeconômica e Ambiental da Produção de Etanol de Milho no Centro Oeste Brasileiro, INPUT Brazil**. 2018. Disponível em: https://www.inputbrasil.org/wp-content/uploads/2018/06/Estudo_Etanol-de-Milho_Agroicone_FINAL2.pdf. Acesso em: 22 mar 2022

MUELLER, Steffen, and John Kwik, 2012, **Corn Ethanol: Emerging Plant Energy and Environmental Technologies**, Energy Resources Center, College of Engineering, University of Illinois at Chicago.

MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; VALENTE, M.S.; XAVIER, C.E.O.; KULAY, L.A.; DONKE, C.G.; MATSUURA, M.I. da S.F.; RAMOS, N.P.; MORANDI, M.A.B.; BONOMI, A.; CAPITANI, D.H.D.; CHAGAS, M.F.; CAVALETT, O.; GOUVÊIA, V.L.R. de. **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, n.41, p.147-208, 2014.

MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; VALENTE, M.S.; XAVIER, C.E.O.; KULAY, L.A.; DONKE, C.G.; MATSUURA, M.I. da S.F.; RAMOS, N.P.; MORANDI, M.A.B.; BONOMI, A.; CAPITANI, D.H.D.; CHAGAS, M.F.; CAVALETT, O.; GOUVÊIA, V.L.R. de. **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, n.41, p.147-208, 2014.

MISSAWA, Silvia Kazue. **Modificação de linhagens industriais de *Saccharomyces cerevisiae* para o aumento da produtividade de álcool e floculação condicional.**

Orientadores: Dr. Gonçalo Amarante Guimarães Pereira e Dr. Anderson Ferreira da Cunha.

2009. 150 p. Tese (Doutorado em Genética e Biologia Molecular) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em:

http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/316777/1/Missawa_SilviaKazue_D.pdf
f. Acesso em: 15 mar. 2022.

NAJAFI, M. F.; KEMBHAVI, A. **One step purification and characterization of an extracellular α - amylase from marine *Vibrio* sp.** Enzyme and Microbial Technology, v. 36, p. 535–539, 2005.

NETTO, A. G.; DIAS, J. M. C. S. **Política energética para a agricultura.** In: Simpósio sobre energia na agricultura, tecnologias poupadoras de insumos, integração de sistemas energéticos e produção de alimentos, 1., 1984, Jaboticabal. Anais...Jaboticabal: FCAV/UNESP, 1984. p. 3-22.

NEVES, MF; MILAN,P; VALÉRIO,V.N; DELSIN,F.G; CAMBAÚVA,V; MARTINEZ, L.F; MOREIRA,M.M.R; ARANTES,S; TEIXEIRA,G.O; **Etanol de Milho: Cenário Atual e Perspectivas para a Cadeia no Brasil,** 2021. 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: 27 mar. 2022

OCDE-FAO. **Perspectivas Agrícolas 2019-2028**. OECD Publishing, Paris/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/7b2e8ba3-es>. Acesso em: 26 mar. de 2022.

PAULILLO, L.F. et al. **Análise da competitividade das cadeias de agroenergia no Brasil**. In: BUAINAIN, A.M.; BATALHA, M.O. (Coord.). *Análise da competitividade das cadeias agroindustriais brasileiras*. São Carlos, SP: DEP-UFSCAR/IE-UNICAMP, 2006. 119p.

PEDERSEN, M. B.; DALSGAARD, S.; KNUDSEN, K. E. B.; YU, S. AND LAERKE, H. N. **Compositional profile and variation of Distillers Dried Grains with Solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides**. *Animal Feed Science and Technology*. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.011>. Acesso em: 28 mar. 2022

PEREIRA FILHO, I. A. **Cultivo do milho**. J. C. C. Cruz (Ed.). Embrapa Milho e Sorgo. Porto Alegre, 2010.

PEREIRA, T. d., Santos, B. C., & Neves, G. Z. (2020). **Variabilidade pluviométrica do estado do Mato Grosso**. *Revista Geonorte*.

PEREIRA WVS. **Ethanol flex plant: technical and economic feasibility study of corn use in the sugarcane off-season**. Undergraduate Thesis. Universidade Federal de Viçosa; 2017. Disponível: [http://refhub.elsevier.com/S1364-0321\(20\)30675-4/sref48](http://refhub.elsevier.com/S1364-0321(20)30675-4/sref48) Acesso em: 27 mar. 2022

PEIXOTO, S. C.; JORGE, J. A.; TERENCEZI, H. F.; POLIZELI, M. L. T. M. **Rhizopus microsporus var. rhizopodiformis: a thermotolerant fungus with potential for production of thermostable amylases**. *International Microbiology*, v. 6, p. 269–273, 2003.

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

PIMENTEL, David. **Ethanol Fuels: Energy Security, Economics, and the Environment**. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 4(2007):1-13.

PECEGE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil:**

fechamento da safra 2011/2012. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2013. 50 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).

RAUSCH, K.D. **Maise wet milling**, Elsevier 2016, p.458-464

REIS, R.A., ROMANZINI, E.P. **O que esperar do uso de DDG na pecuária de corte?** Research Release. (Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp – Jaboticabal/SP. 2020.

RFA. RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **2019 Ethanol Industry Outlook.** Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2019/02/RFA2019Outlook.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

RFA - RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Markets & Statistics Annual Ethanol Production.** U. S. & World ethanol production. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/>. Acesso em: 26 mar. de 2022.

RIQUETTI, N. B.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. A. **Demanda energética em diferentes manejos de solo e híbridos de milho.** RevistaEnergianaAgricultura, Botucatu, v.27, n.2, p. 76-85, 2012.

ROBERTSON, George H.; et al. **Native or raw starch digestion: a key step in energy efficient biorefining of grain.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 54, n. 2, p. 353-365, jan, 2006.

SANTOS, L.F., **Xilanases:** principais metodologias e parâmetros cinéticos. Journal of biotechnology and biodiversity v.2, 2011

SCIPIONI, Gustavo Callegari. **Otimização do processo de sacarificação do amido de batata (Solanum Tuberosum L.) utilizando enzimas amilolíticas.** Orientador: Prof^a Dr.^a Lisiane de Marsillac Terra. 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: 12 mar. 2022.

SCULLY, M.J.; NORRIS, G.A.; FALCONI, T.M.A.; MACINTOSH, D.L.; 2021. **Carbon intensity of corn ethanol in the United States: state of the science**. Environmental Health & Engineering, Inc., Newton, MA 02459, United States of America. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abde08> Acesso em: 01 abr. 2022

SERNA-SALDIVAR, S. (2018). **Corn: Chemistry and Technology**. CRC Press. Boca Raton, FL. Third edition.

SHAPURI, H., Paul Gallagher, Ward Nefstead, R. Butler, S. Noe. **2008 Energy Balance for the Corn-Ethanol Industry**. AER No. 846, Office of Energy Policy and New Uses, U.S. Department of Agriculture, March 2010.

SHIM, M.Y., PESTI, G.M., BAKALLI, R.I., TILLMAN, P.B., & PAYNE, R.L. 2011. **Evaluation of DDGS as an Alternative Ingredient for Broiler Chickens**. Poultry Science.90, 369-376. 10.3382/ps.2010-00727.

SIGNORI, G; RASMUSSEM, R; FILHO,J.M.; GOLDSMITH, P. **Milho complementa etanol na entressafra da cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA08-materia-prima05.pdf> Acesso em: 27 mar. 2022

SILVA, H. J. T. da; SANTOS, P. F. A.; NOGUEIRA JUNIOR, E. C.; VIAN, A. E. de F. **Aspectos Técnicos e Econômicos da Produção de Etanol de Milho no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1567>. Acesso em:27 mar. 2022.

SNA- Sociedade Nacional de Agricultura. **Etanol de milho ‘flex’ teve custo menor que o da cana em 2018/19**. 2020. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/etanol-de-milho-flex-teve-custo-menor-que-o-de-cana-em-2018-19/>. Acesso em:27 mar. 2022.

SOLOGUREN, L. **Brasil: o novo desafio para consolidar as exportações do milho**. São Paulo: Conselho de Informações sobre Biotecnologia, 2007. 2p. Disponível em: <http://www.nippo.com.br/campo/artigos/artigo430.php>. Acesso em: 03 mar. 2022.

SOUZA, C.; ANDREOLI. **Cana-de-açúcar: a melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol**. Economia e Energia, Belo Horizonte, n.59, 4p, 2007. Disponível em: http://ecen.com/eee59/eee59p/cana_melhor_conversorl.htm. Acesso em: 03 mar. 2022.

SYNGENTA. **Etanol de milho: opção sustentável ganha força no Brasil.** 2022. Disponível em: <https://www.portalsyngenta.com.br/noticias/etanol-de-milho-opcao-sustentavel-ganha-forca-no-brasil#:~:text=J%C3%A1%20em%202020%2C%20foi%20registrada,litros%20na%20temporada%202019%2F2020>. Acesso em: 23 abr. 2022.

SWIETKIEWICZ, S, KORELESKI, J. **The use of distillers dried grains with solubles (DDGS) in poultry nutrition.** (DDGS) in poultry nutrition. World's Poultry Sci. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0043933908000044>. Acesso em: 25 mar. 2022

TIRADO, M. C.; COHEN, M. J.; ABERMAN, N.; MEERMAN, J.; THOMPSON, B.
Addressing the

Challenges of Climate Change and Biofuel Production for Food and Nutrition Security. Food Research International, v. 43, n. 7, p. 1729–1744, 2010.

UDOP – União Nacional de Bioenergia do Brasil. **Consumo de Etanol anima nova safra 2019/20. 2019.** Disponível em: <https://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1177503>. Acesso em: 27 mar. 2022

UNEM. União Nacional do Etanol de Milho. **Cenários e perspectivas para etanol de milho.** Cuiabá, 2020. Disponível em: <http://www.etanoldemilho.com.br/2020/12/15/producao-de-etanol-de-milho-sefirma-no-pais-e-deve-dobrar-este-ano/>. Acesso em: 26 mar. 2022

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Life cycle assessment: what it is and how to do it.** Paris: Unep, 1996.

US Environmental Protection Agency 2019 **Renewable Fuel Standard program.** Disponível em: www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/overview-renewable-fuel-standard. Acesso em: 05 abr. 2022

USDA 2016: 2015 **Energy balance of corn-ethanol industry.** Office of the chief economist. Disponível em: <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/2015EnergyBalanceCornEthanol.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2022

VAN DER VEEN, B.A.; UITDEHAAG, J.C.M.; DIJKSTRA, B.W. E DIJKHUIZEN, L. **Engineering of cyclodextrin glycosyltransferase reaction and product specificity.**

Biochimica et Biophysica Acta. v. 1543, p. 336-360, 2000.

VILELA, D.; ARAÚJO, P.M.M. **Contribuições das câmaras setoriais e temáticas à formulação de políticas públicas e privadas para o agronegócio.** Brasília, DF:

MAPA/SE/CGAC, 2006. 496p.

WANG, Chunxiao; MAS, Albert; ESTEVE-ZARZOSO, Braulio. **Interaction between *Hanseniaspora uvarum* and *Saccharomyces cerevisiae* during alcoholic fermentation.**

International Journal of Food Microbiology. v. 206, p. 67–74. 2015. Disponível em:

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25956738>. Acesso em: 15 mar 2022

WANG, B., DONG, Y., FANG, Y., GAO, W., KANG, X., LIU, P., ABD EL-ATY, A. M. (2022). **Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion.** *Food Chemistry*, 368, 130804. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130804> Acesso em: 28 mar. 2022

XAVIER, C. E. O. *et al.* **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: safra 2008/2009.** Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de

Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2009. 82 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA).

XIAODONG Du, X., & Carriquiry, M. A. (2013). **Flex-fuel vehicle adoption and dynamics of ethanol prices: lessons from Brazil.** *Energy Policy*, 59, 507–512. Disponível em:

<https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.008>. Acesso em: 26 mar. 2022

YACOBUCCI, B.D.; SCHNEPF, R.D. **Ethanol and biofuels: agriculture, infrastructure, and market constraints related to expanded production.** Washington: Congressional Research Service, 2007