

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Aplicação de feixe de elétrons para esterilização de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana energia, visando à produção de etanol

Rafael Soares Douradinho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Bioenergia

Piracicaba
2023



Rafael Soares Douradinho
Engenheiro Agrônomo

Aplicação de feixe de elétrons para esterilização de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana energia, visando à produção de etanol

Orientador:
Prof. Dr. **ANTONIO SAMPAIO BAPTISTA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Bioenergia

Piracicaba
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Douradinho, Rafael Soares

Aplicação de feixe de elétrons para esterilização de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana energia, visando à produção de etanol / Rafael Soares Douradinho. - - Piracicaba, 2023.

224 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade Estadual de Campinas. Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"

1. Agroindústria 2. Tecnologia sucroenergética 3. Etanol de milho 4. Cana energia 5. Fermentação alcoólica 6. Feixe de elétrons 7. Esterilização de mosto I. Título.

DEDICATÓRIA

A todos que,
por meio do trabalho e do exemplo,
constroem um país livre e justo às futuras gerações.

À minha família,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Antonio Sampaio Baptista.

Ao conselheiro, Prof. Dr. Jorge Horii.

À Prof. Dra. Suani Teixeira Coelho (IEE/USP), Prof. Dr. Lucílio Alves (CEPEA/ESALQ), Prof. Dr. Valter Arthur (CENA/USP), Dr. Paulo Relá (IPEN/USP) e Dr. Danilo Perecin (IEE/USP), por todas as instruções, contribuições e apoio.

Ao Dr. João Monnerat (UFRJ) e ao Sr. Pedro Granja Jr. (IBBA), pelas contribuições, instruções e participação neste estudo via *SINOCHEM Petróleo Brasil*. À Glauce Nascimento, Monique dos Santos, Ferlaque Fonseca, Rodolpho Monteiro e à *SINOCHEM Petróleo Brasil*, pela participação neste estudo e suporte financeiro.

À Prof. Dra. Sônia Maria Stefano Piedade (LCE/ESALQ), por todo apoio e orientação para a condução das análises estatísticas.

Ao Sr. João Eduardo Pereira e à *Lallemand Biofuels & Distilled Spirits*, por toda atenção, instrução, apoio e disponibilização da levedura *Thermosacc® Dry*, utilizada neste estudo.

À Renata Kleinhappel, por toda atenção, apoio e instruções técnicas. Ao Luciano Stuchi, Bruno Menezes, Angelina Oliveira, Jéssica Santos e à *Novozymes*, pelo pronto apoio, atenção e disponibilização das enzimas *Liquozyme®* e *Spirizyme®*, utilizadas neste estudo.

Ao Sr. Zezinho Granelli, Sr. Claudinei Rodrigues e à *Usina Granelli*, por toda atenção, constante apoio e disponibilização de materiais.

Ao Hélder, Sr. Toninho e à *AGN Bioenergia*, por todo apoio e disponibilização da cana energia.

Ao Glauber dos Santos e ao *Pecege*, pelo apoio e informações disponibilizadas.

À Dra. Elizabeth Somessari, Dr. Samir Somessari, Sr. Carlos, Sr. Diego, Prof. Dr. Pablo Vasquez e ao *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP)*, por toda orientação, receptividade enquanto aluno visitante e apoio quanto à utilização da estrutura e acelerador de elétrons.

Ao Dr. Ivan Dybov, Dr. Gonçalo Castillo e à *ROSATOM State Atomic Energy Corporation*, pela atenção, apoio e informações.

Ao Prof. Dr. Gabriel Margarido, Prof. Dr. Carlos Labate, Sr. Fábio Rodrigues e Sr. Alexandre Joviniano, pela receptividade junto ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Bioenergia, enquanto aluno e enquanto representante discente, e por toda orientação e suporte.

Aos amigos do LTSBio, por todo apoio.

Aos alunos de iniciação científica Victor Kainã, Pedro Franco, Maria Carolina, Vitor Mariano, Eduardo Castro, ao mestrando Gustavo Hussein e ao Dr. Marcelo Gomes. Aos especialistas Laysa, Bianca e Eric.

Aos técnicos e servidores do Setor de Açúcar e Álcool da ESALQ/USP: Pedro Dorival Lucentini, Sylvino Torrezan, Rose Leonessa, Maria Joana de Oliveira, Benedito Araújo, Wilson Januário, Luiz Carlos Rodrigues e Luciana Tsuji, por toda atenção e apoio.

À *POLI/USP*, *EMBRAPII* e *FUSP*, pela participação neste estudo e suporte administrativo. Ao Prof. Dr. Jorge Tenório, Prof. Dr. Thiago Basso, Prof. Dr. Aldo Tonso, Prof. Dra. Marcela Baltazar, Dr. Carlos Gonzalo, Juliana Santos e Nathalia Silva.

Ao *Instituto Brasileiro de Bioenergia e Agronegócios – IBBA* e seus associados, por toda confiança e apoio.

Aos irmãos, da República *Saudades da Minha Égua*. Por todo incentivo e apoio sempre.

Ao conselheiro, Dr. Erico Rolim de Mattos. Aos amigos e professores, do setor sucroenergético: Bernardo Ide, José Teodoro, José de Paula, Armene Conde, Valcir Palota, Isaac Pinho, Douglas Rocha, Paulo Belfort, Samuel Gazzola, Rodrigo Amoroso, Adalberto Godoy, Lucas Ferrari, Regivaldo Cavalcanti, Américo Ferraz e Fabiano Zillo. Por toda confiança, apoio e ensinamentos.

À Dra. Rosane Piccoli (IPT) e ao Dr. K.C. Das (UGA), pelas oportunidades e ensinamentos essenciais para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

NOTA AO LEITOR

Em função das alterações na nomenclatura do gênero *Lactobacillus* (ZHENG *et al.*, 2020), neste trabalho onde reporta-se *Lactobacillus fermentum*, lê-se *Limosilactobacillus fermentum* (*Lim.fermentum*); e onde reporta-se *Lactobacillus plantarum*, lê-se *Lactiplantibacillus plantarum* (*Lpb.plantarum*).

Esta é a versão simplificada e pública da Tese, conforme Resolução CoPGr N° 7569 de 03 de outubro de 2018. A versão integral foi mantida em acervo reservado na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, a fim de resguardar patentes, direitos autorais e outros direitos, próprios ou alheios, referentes a este trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE QUADROS.....	10
LISTA DE SIGLAS	15
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Considerações gerais	19
1.2. Aspectos relevantes do trabalho	22
1.3. Objetivos.....	23
1.4. Hipótese.....	24
1.5. Contribuições originais	25
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1. Etanol: panorama global.....	27
2.1.1. Panorama norte-americano.....	29
2.1.2. Panorama brasileiro	33
2.2. Etanol de milho no Brasil	38
2.2.1. Contexto nacional	38
2.2.2. Cadeia do etanol de milho	44
2.2.3. Matéria-prima	46
2.2.3.1. Milho de segunda safra	49
2.2.3.2. Milho como fonte de açúcares	61
2.2.4. Biomassa como fonte de energia ao processo	62
2.2.4.1. Cana como fonte de biomassa: cana energia.....	64
2.3. Processo convencional de produção de etanol a partir de milho.....	73
2.3.1. Etanol de milho	73
2.3.2. Preparo do mosto	75
2.3.2.1. Rota de moagem dos grãos de milho	75
2.3.2.2. Hidrólise	77
2.3.3. Fermentação alcoólica	81

2.3.3.1. Propagação do fermento	81
2.3.3.2. Batelada alimentada	82
2.4. Processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar.....	83
2.4.1. Etanol de cana-de-açúcar	83
2.4.2. Preparo do mosto	84
2.4.2.1. Preparo da cana e extração do caldo	84
2.4.2.2. Clarificação do caldo	85
2.4.3. Fermentação alcoólica.....	87
2.4.3.1. Processo contínuo	88
2.4.3.2. Batelada alimentada	89
2.5. Contaminantes em processos de produção de etanol	89
2.5.1. Fontes de contaminação	89
2.5.2. Microrganismos contaminantes.....	90
2.5.3. Efeitos da contaminação	90
2.6. Tratamento ácido do fermento e o reciclo das células de levedura	91
2.7. Produto e coprodutos	92
2.8. Receitas e custos	94
2.9. Sustentabilidade.....	96
2.9.1. Balanço energético	97
2.9.2. Intensidade de carbono.....	99
2.9.3. Renovabio	99
2.10. Controle dos microrganismos contaminantes presentes no mosto.....	103
2.10.1. Melle-Boinot: tratamento ácido do fermento	103
2.10.2. Biocida: dióxido de cloro para tratamento do fermento e mosto.....	104
2.10.3. Radiação ionizante: tratamento do mosto.....	104
2.11. Radiação ionizante: feixe de elétrons	105
2.11.1. Contextualização histórica	106
2.11.2. Aplicações.....	107
2.11.3. Efeitos	109
2.11.3.1. Efeito direto.....	110
2.11.3.2. Efeito indireto.....	110
2.11.4. Radiólise da água.....	111

2.11.5. Interação com microrganismos	112
2.11.6 Interação com açúcares	115
2.11.7. Irradiação de materiais	116
2.11.8 Fontes de radiação.....	118
2.11.8.1. Radiação gama.....	119
2.11.8.2. Feixe de elétrons.....	119
2.11.8.3. Raios X.....	120
2.11.9 Feixe de elétrons	120
2.11.9.1. Aceleradores de elétrons.....	123
2.11.9.2. Vantagens do uso de feixe de elétrons	125
REFERÊNCIAS	127

RESUMO

Aplicação de feixe de elétrons para esterilização de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana energia, visando à produção de etanol

A busca pela sustentabilidade e a crescente demanda energética tem direcionado a atenção da humanidade aos biocombustíveis. A geração de etanol brasileiro representou 27% da produção mundial em 2021 e a perspectiva é que em 2029 o país alcance a produção de 47 bilhões de litros. Para isto, será necessário aumentar o número de unidades industriais de produção do biocombustível, revelar tecnologias para aumentar a eficiência do processo e viabilizar a diversificação de matérias-primas para produzi-lo. Neste sentido, o milho tem chamado a atenção como matéria-prima para a produção de etanol no Brasil. Para esta matéria-prima há possibilidade de combinação de diferentes biomassas agroenergéticas como fonte renovável de energia ao processo de produção. O bagaço de cana energia pode atender a demanda energética do sistema de produção e agregar valor por meio da redução de custos e adequação do balanço energético. Também, torna possível o direcionamento do excedente energético para o acionamento de um acelerador de elétrons como fonte de radiação ionizante, a qual pode inativar a população de microrganismos contaminantes presentes no mosto. E, além disso, possibilita o aproveitamento do caldo como fonte de carbono às leveduras. Por este motivo, os objetivos deste trabalho foram: a) avaliar a fermentação alcoólica de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana; b) validar a dose de feixe de elétrons suficiente para inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto; c) investigar os efeitos da irradiação do mosto com feixe de elétrons sobre o aumento da eficiência e produtividade da fermentação alcoólica; d) investigar a possibilidade de reciclo das células de levedura neste processo de produção de etanol a partir de milho; e) verificar a sustentabilidade energética, ambiental e econômica do processo conduzido nestas condições. O estudo foi realizado em 4 etapas. O aproveitamento do caldo de cana em substituição à água utilizada na etapa hidrólise não prejudicou a sacarificação do amido e, conseqüentemente, proporcionou incremento de açúcares no mosto obtido. A fermentação deste mosto apresentou eficiência e produtividade, respectivamente, 7,8% e 21,6% maiores que os resultados observados em mosto obtido a partir da hidrólise do milho em água. A irradiação do mosto em dose 20 kGy de feixe de elétrons foi suficiente para a completa inativação da população (10^8 UFC mL⁻¹) de microrganismos contaminantes. O mosto cuja população de microrganismos contaminantes foi inativada com feixe de elétrons apresentou eficiência de fermentação 5,1% maior que a eficiência observada em mosto não tratado; e o reciclo das células de levedura se mostrou tecnicamente viável apenas em mosto cuja carga microbiana foi inativada. Considerando apenas o efeito da irradiação do mosto com feixe de elétrons, um incremento de 5% na produção nacional de etanol seria equivalente a 1,5 bilhão de litros – ou, R\$5,7 bilhões em produto comercializado anualmente. O mesmo aumento de produção pelos meios convencionais, exigiria a implantação de 8 novas usinas de etanol de milho com produção de 200 milhões de litros por ano; e o processamento adicional de 3,75 milhões de toneladas de milho. O bioetanol produzido a partir de milho hidrolisado em caldo de cana e com mosto irradiado com feixe de elétrons apresentou balanço energético, intensidade de carbono e Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) estimados em 5,37, 22,09 gCO₂eq MJ⁻¹ e 65,31 gCO₂eq MJ⁻¹, respectivamente. O estudo de viabilidade econômica do sistema de produção apresentou VPL positivo e *payback* estimado em 5 anos.

Palavras-chave: Agroindústria, Tecnologia sucroenergética, Etanol de milho, Cana energia, Fermentação alcoólica, Feixe de elétrons, Esterilização de mosto

ABSTRACT

Electron beam application to sterilize wort obtained through hydrolysis of corn in energy cane juice, aiming the production of ethanol

The search for sustainability and the increasing energy demand has driven humanity's attention to biofuels. Brazilian ethanol production accounts for 27% of global production in 2021 and the forecast is that by 2030 the country will produce roughly 47 billion liters per year. Thus, it will be necessary to increase the number of biofuel production's facilities, develop technologies to optimize the process and make viable the diversification of raw materials. Corn has attracted attention as raw material for biofuel production in Brazil. For this, there is the possibility to combine different agro-energy biomass as renewable energy source for the process. The bagasse of energy cane may supply the energy demand of the production system and add value through cost reduction and adequacy of the energy balance. Also, it becomes possible to direct the energy surplus to drive an electron accelerator as a source of ionizing radiation – which can inactivate the population of contaminating microorganisms present in wort. And, in addition, it enables the use of energy cane juice as carbon source to the yeasts. For this reason, the objectives of this study were: a) evaluate the alcoholic fermentation of must obtained from the hydrolysis of corn in cane juice; b) validate the dose of electron beam sufficient for inactivation of the contaminating microorganisms present in wort; c) investigate the effects of electron beam wort irradiation on the possible increase of efficiency and productivity of alcoholic fermentation; d) investigate the possibility of recycling yeast cells in this corn ethanol's production process; e) verify the energy, environmental and economic sustainability of the process conducted under these conditions. The study was conducted in 4 stages. The use of cane juice to replace the water conventionally added in the hydrolysis stage did not impair the saccharification of starch and, consequently, provided increase in sugars in the wort obtained. The fermentation of this wort presented efficiency and productivity, respectively, 7.8% and 21.6% higher than the results observed in must obtained from the hydrolysis of corn in water. The irradiation of the wort at dose of 20 kGy of electron beam was sufficient for the complete inactivation of the population (10^8 CFU mL⁻¹) of contaminating microorganisms. The must whose population of contaminating microorganisms was inactivated with electron beam presented fermentation efficiency 5.1% higher than the efficiency observed in untreated wort; and the recycling of yeast cells proved technically feasible only in wort whose microbial load was inactivated. Considering only the effect of the irradiation of the wort with electron beam, an increase of 5% in the Brazilian production of ethanol would be equivalent to 1.5 billion liters – or, R\$ 5.7 billion in product marketed annually. The same increase in production by conventional means, would require the implementation of 8 new corn ethanol plants with production of 200 million liters per year; and the additional processing of 3.75 million tons of corn. The bioethanol produced from corn hydrolyzed in cane juice and with wort irradiated with electron beam presented energy balance, carbon intensity and Energetic-Environmental Biofuel Index (NEEA) estimated at 5.37, 22.09 gCO₂eq MJ⁻¹ and 65.31 gCO₂eq MJ⁻¹, respectively. The economic feasibility study of the production system showed positive NPV and payback period of 5 years.

Keywords: Agroindustry, Sugar-energy technology, Corn ethanol, Energy cane, Alcoholic fermentation, Electron beam, Wort sterilization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Principais países produtores de etanol e suas respectivas contribuições quanto à produção mundial do biocombustível.	28
Figura 2.	Contribuição dos países Estados Unidos da América e Brasil sobre a produção mundial de etanol....	29
Figura 3.	Evolução da produção e capacidade de produção norte-americana de etanol, bem como a quantidade de plantas industriais em operação.	31
Figura 4.	Região norte-americana de produção de milho (“ <i>corn belt</i> ” ou cinturão do milho).....	32
Figura 5.	Produção norte-americana de milho e parcela da produção do cereal destinada à produção de etanol.....	33
Figura 6.	Evolução da produção brasileira de etanol entre os anos 2003 e 2020.....	34
Figura 7.	Consumo de energia no setor de transportes.	35
Figura 8.	Produção de energia primária no Brasil entre 1970 e 2020.	35
Figura 9.	Produção brasileira de etanol por região.	36
Figura 10.	Principais países importadores de etanol brasileiro.....	37
Figura 11.	Evolução da produção brasileira de etanol de acordo com as matérias-primas milho e cana-de-açúcar (em milhões de litros).	39
Figura 12.	Produção de milho nos estados brasileiros, com destaque ao estado de Mato Grosso – maior produtor nacional.	40
Figura 13.	Produção brasileira de etanol de milho e respectivos incrementos anuais sobre a produção.	41
Figura 14.	Representação da produção brasileira de etanol, com destaque para o volume produzido no estado de Mato Grosso.	43
Figura 15.	Fluxograma do processo convencional SHF (“ <i>Separate Hydrolysis and Fermentation</i> ”) de produção de etanol de milho: hidrólise e fermentação conduzida em etapas distintas.	45
Figura 16.	Matérias-primas e respectivas etapas do processo necessárias para produção de etanol.	48
Figura 17.	Produção de milho no Brasil, na região Centro-Oeste e no estado de Mato Grosso, e a demanda de grãos de milho para a produção de etanol.....	50
Figura 18.	Evolução da produção de milho no Brasil e especificamente no estado de Mato Grosso, entre as safras 1976/77 e 2019/20.....	53
Figura 19.	Evolução do consumo, produção e excedente de grãos de milho no estado de Mato Grosso.....	54
Figura 20.	Comparativo de preços da saca de milho nos estados de São Paulo e Mato Grosso, entre os anos de 2008 e 2018.	55
Figura 21.	Área de cultivo de soja e área de cultivo de milho segunda safra na região Centro-oeste.....	566

Figura 22.	Destinação dos grãos de milho produzidos no estado de Mato Grosso.....	58
Figura 23.	Projeção e estimativa de produção, consumo e exportação brasileira de milho.	59
Figura 24.	Grãos de milho sendo armazenados a céu aberto (condição inadequada) pelo fato dos produtores priorizarem o uso dos secadores de cereais para armazenamento de soja (estado de Mato Grosso, 2017).	60
Figura 25.	Registro fotográfico de planta de milho.	61
Figura 26.	Informações técnicas sobre a cana sacarose e a cana energia.....	70
Figura 27.	Resultados de produção de fibra e açúcar por hectare de cana sacarose variedade RB92-579 e cana energia cultivar Vertix 2 ao longo de 7 safras.....	73
Figura 28.	Fluxograma simplificado de produção de etanol de milho.....	76
Figura 29.	Representação da forma estrutural dos componentes do amido: amilose e amilopectina.....	778
Figura 30.	Representação estequiométrica da hidrólise do amido.	778
Figura 31.	Representação ilustrativa da forma de ação das enzimas α -amilase e amiloglicosidase sobre estrutura do amido.	79
Figura 32.	Fluxograma do processo convencional SHF (“ <i>Separate Hydrolysis and Fermentation</i> ”) de produção de etanol de milho.	80
Figura 33.	Processo de recuperação de açúcares por meio de filtro rotativo à vacuo.....	86
Figura 34.	Fluxograma de produção de etanol e açúcar a partir de cana-de-açúcar.	87
Figura 35.	Curva típica (cinética) de crescimento da população de leveduras.....	89
Figura 36.	Esquema representativo simplificado do processo Melle-Boinot de tratamento ácido e reciclo da levedura utilizada na fermentação alcoólica.	92
Figura 37.	Esquema conceitual da Política Nacional de Biocombustíveis – Renovabio.	100
Figura 38.	Esquema representativo simplificado do processo Melle-Boinot de tratamento ácido e reciclo da levedura utilizada na fermentação alcoólica.	104
Figura 39.	Ilustração dos efeitos indiretos da radiação ionizante sobre a célula.	113
Figura 40.	Esquemas básicos do dispositivo de irradiação por meio de feixe de elétrons.....	121
Figura 41.	Esquema básico do dispositivo de irradiação desenvolvido por Rela (2003).	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Principais propriedades do etanol.....	38
Tabela 2.	Produção brasileira de etanol de milho.....	42
Tabela 3.	Características das principais matérias-primas utilizadas para produção de bioetanol.....	47
Tabela 4.	Produção de milho 1ª e 2ª safras por estado brasileiro.	51
Tabela 5.	Evolução da produção brasileira de etanol de milho por estado produtor.....	52
Tabela 6.	Produção, consumo e excedente de grão de milho no estado de Mato Grosso, entre as safras 2011/12 e 2019/20.	54
Tabela 7.	Comparativo entre os preços médios da saca de milho praticados nos estados brasileiros de São Paulo e Mato Grosso.	55
Tabela 8.	Potencial de produção de milho safrinha na macrorregião Centro-Oeste.....	57
Tabela 9.	Composição química do grão de milho, em percentual médio.	62
Tabela 10.	Demanda energética do processo industrial de produção de etanol de milho estratificada em etapas e seus respectivos percentuais de contribuição.	63
Tabela 11.	Produção de cana-de-açúcar no Brasil por região e unidade federativa.	66
Tabela 12.	Área de produção de cana por região e unidade federativa.	667
Tabela 13.	Características de clones de cana energia (cana planta) em comparação à variedade RB72-454..	69
Tabela 14.	Composição físico-química do bagaço de cana.	71
Tabela 15.	Composição do custo de produção do etanol de milho.	95
Tabela 16.	Contribuição de cada produto na composição da receita obtida pela unidade de produção de etanol de milho.	95
Tabela 17.	Metas de descarbonização segundo a Política Nacional de Biocombustíveis - Renovabio.....	102

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1. Configurações de sistema existentes para a produção de etanol de milho, considerando a possibilidade de compartilhamento da estrutura utilizada no processamento de cana-de-açúcar..... 74
- Quadro 2. Períodos de integração e processamento das matérias-primas de acordo com as configurações de sistema de produção de etanol de milho já existentes. 74

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AOAC	: <i>Association of Official Analytical Collaboration</i>
ART	: Açúcares redutores totais
ATP	: Trifosfato de adenosina
ATR	: Açúcares totais recuperáveis
BEN	: Balanço Energético Nacional
BNDES	: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BPF	: Boas Práticas de Fabricação
Brix	: Escala correspondente ao teor de sólidos solúveis
B3	: Banco B3 S.A. (Bolsa de Valores do Brasil)
C ₂ H ₅ OH	: Etanol
C ₆ H ₁₀ O ₅	: Amido
C ₆ H ₁₂ O ₆	: Açúcares redutores
Ca(OH) ₂	: Hidróxido de cálcio
CAPEX	: <i>Capital expenditure</i>
CAR	: Cadastro Ambiental Rural
CAS	: <i>Chemicals Abstract Service</i> , identificador químico
CBIO	: Crédito de descarbonização
CCEE	: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDC	: <i>Centers for Disease Control and Prevention</i>
CEPEA	: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CGAPI	: Coordenação Geral de Avaliação de Política e Informação
CGEE	: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CMR	: Concentração Mínima Requerida
CNA	: Confederação Nacional da Agricultura
CNEN	: Comissão Nacional da Energia Nuclear
CNPE	: Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	: Dióxido de carbono
CO ₂ eq	: Equivalente em dióxido de carbono
⁶⁰ Co	: Cobalto-60
COMEX	: Comércio exterior
CONAB	: Companhia Nacional de Abastecimento
CONSECANA	: Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de SP
COP21	: Conferência das Partes sobre a Mudança do Clima, 21 ^a edição
COVID-19	: <i>Coronavirus disease 2019</i>
CTR	: Centro de Tecnologia das Radiações

<i>D</i>	: Dose absorvida (Gray)
D10	: Dose de radiação (Gy) suficiente para reduzir a população microbiana em 90%
DC	: Corrente direta
DCI	: Departamento de Crédito e Informação
DDG	: <i>Dried distillers grains</i>
DDGS	: <i>Dried distillers grains with solubles</i>
<i>dε</i>	: Quantidade de energia (radiação) que interage com o material (Joule)
<i>Di</i>	: Dose de radiação (Gray)
<i>dm</i>	: Massa de material que recebe energia (quilograma)
DNS	: Ácido 3,5-dinitrosalicílico
E10	: Indicação de combustível contendo 10% de etanol anidro
EIA	: <i>U.S. Energy Information Administration</i>
EISA	: <i>Energy Independence and Security Act</i>
Embrapa	: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	: Empresa de Pesquisa Energética
ER	: <i>Energy ratio</i>
ESG	: <i>Environmental, social and governance sustainability</i>
EUA	: Estados Unidos da América
FAO	: <i>Food and Agriculture Organization</i>
FC	: Fluxo de caixa
GEE	: Gases do efeito estufa
GL	: Gay Lussac
GMP	: <i>Good Manufacturing Practices</i>
GWP	: <i>Global Warming Potential</i>
Gy	: Gray
H ₂	: Hidrogênio molecular
H ₂ O ₂	: Peróxido de hidrogênio
<i>i</i>	: Taxa de desconto do projeto
<i>I₀</i>	: Investimento inicial (tempo 0)
IAEA	: <i>International Atomic Energy Agency</i>
IC	: Intensidade de Carbono
IEA	: <i>International Energy Agency</i>
IIA	: <i>International Irradiation Association</i>
IMEA	: Instituto Mato-grossense de Economia Aplicada
INPASA	: <i>Industria Paraguaya de Alcoholes S.A.</i>
INPM	: Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IPCC	: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPEN	: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRENA	: <i>International Renewable Energy Agency</i>

IRR	: <i>Intern Return Rate</i>
I_t	: Investimento previsto em período subsequente
kGy	: kiloGray
LFIR	: Laboratório de Fontes Intensas de Radiação
MAPA	: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDIC	: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MeV	: Mega elétron-Volts
MME	: Ministério de Minas e Energia
MTBE	: Éter metil-terc-butílico
n	: Quantidade total de amostras irradiadas
N_0	: População inicial de microrganismos
NDC	: Contribuições determinadas nacionalmente
NEEA	: Nota de Eficiência Energético-Ambiental
N_f	: População final de microrganismos
NH_4^+	: Íon amônio
GEE	: Gases do efeito estufa
O_3	: Ozônio
OAPEC	: Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo
ODS	: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	: <i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
°GL	: Fração líquida percentual de etanol em solução (mL por 100 mL de mistura)
OMS	: Organização Mundial da Saúde
OPEX	: <i>Operational expenditure</i>
ORPLANA	: Organização dos Plantadores de Cana do Estado São Paulo
PB	: <i>Payback</i>
PCI	: Poder calorífico inferior
Pol	: Teor de sacarose aparente
Proálcool	: Programa Nacional do Alcool
r	: Quantidade de amostras isentas de desenvolvimento microbiano
Renovabio	: Política Nacional de Biocombustíveis
RenovaCalc	: Sistema oficial para quantificação de CBIOs
RFA	: <i>Renewable Fuels Association</i>
RFS	: <i>Renewable Fuel Standard</i>
SHF	: <i>Separate Hydrolysis and Fermentation</i>
SIRE	: Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas
SPA	: Secretaria de Política Agrícola
t	: Período considerado em estudo
TAH	: Toneladas de açúcar por hectare
TFH	: Toneladas de fibra por hectare
TIR	: Taxa interna de retorno

UFC	: Unidades formadoras de colônia
UNEM	: União Nacional do Etanol de Milho
UNICA	: União Nacional da Indústria da Cana-de-açúcar e Bioenergia
μS	: Microsiemens
USDA	: <i>United States Department of Agriculture</i>
USGC	: <i>United States Grains Council</i>
VHG	: <i>Very High Gravity fermentation</i>
VPL	: Valor Presente Líquido
WDG	: <i>Wet Distillers Grains</i>
WHO	: <i>World Health Organization</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Durante a COP21 (21ª Conferência das Partes) governos de cerca de 195 países se reuniram em Paris para buscar um acordo sobre mudança global do clima. Cada um dos países foi instado a apresentar sua ambição para redução de emissões domésticas de gases de efeito estufa (GEE) com o objetivo de limitar o aumento da temperatura no globo terrestre a um máximo de 2°C até 2100, sendo que o Brasil se comprometeu a reduzir, até 2030, as emissões de GEE em 43% em relação aos níveis de 2005 (EPE, 2016). Isso nos mostra o quão necessário são os investimentos em bioenergia, a fim de atender a demanda energética de forma renovável e com sustentabilidade, e atender também as propostas de redução da emissão de gases e descarbonização. A produção de etanol atende a estas exigências e se encaixa perfeitamente no cenário.

Em alguns estados brasileiros há uma grande produção de milho, onde a oferta é muito maior que a demanda. No caso específico do estado de Mato Grosso, onde se produz cerca de 29 milhões de toneladas do grão por ano e o consumo local é de apenas 9 milhões de toneladas (IMEA, 2021) e, além disso, existem limitações de infraestrutura de escoamento do excedente, tem-se buscado uma forma inteligente e sustentável de manter a produção, evitar a perda dos grãos após a colheita e gerar riquezas ao país. Para atingir tais objetivos tem-se intensificado o interesse do país em produzir etanol a partir deste cereal. A operação de unidades industriais de produção de etanol a partir de milho no Brasil é realidade e os investidores sinalizam aumento da produção do biocombustível nos próximos anos.

O processo de produção de etanol a partir de milho demanda fontes externas de energia, uma vez que o processamento dos grãos de milho não gera subproduto para combustão em caldeira e geração de energia. No cenário norte americano há abundância de fontes fósseis de energia tais como gás natural e carvão mineral. Na realidade brasileira, essas fontes estão muito longe dos estados produtores de milho ou estão pouco disponíveis. Por isso, o país deve continuar optando pelo uso de biomassa para suprir a demanda energética das unidades produtoras de etanol a partir de milho. Neste sentido, a utilização do bagaço de cana para combustão em caldeira visando a disponibilizar energia ao processo, se mostra como alternativa potencial e atende às demandas de sustentabilidade ambiental e econômica.

O uso da biomassa como fonte de energia eleva o balanço energético, tornando o biocombustível mais interessante para atingir as normas e metas mundiais de redução de emissão de gases do efeito estufa, e adere ao mercado internacional de biocombustíveis – economia de

baixo carbono. Por este motivo, o presente estudo considera a possibilidade de inserir o bagaço de cana como fonte de energia ao processo.

Ainda visando à otimização de recurso, a opção de enriquecer o hidrolisado de milho com açúcares provenientes do caldo da cana-de-açúcar inserida como fonte de energia ao processo, aumenta a quantidade de açúcar disponível às leveduras para a fermentação alcoólica e, por consequência, aumenta o volume de etanol produzido com a mesma quantidade de milho processado. Também, o uso do caldo de cana na etapa de hidrólise do milho reduz a demanda de água e eleva a sustentabilidade ambiental do biocombustível produzido.

Quanto à fermentação alcoólica, o mosto a ser fermentado em escala industrial é comumente infectado por leveduras selvagens e bactérias contaminantes trazidas juntamente com a matéria-prima e com impurezas. Estes microrganismos contaminantes consomem parte dos açúcares para multiplicação de células e produção de metabólitos. Estes metabólitos, por sua vez, causam intoxicação e queda da viabilidade celular das leveduras e redução da produtividade e eficiência da fermentação, ou seja, reduzem a quantidade de etanol produzida por tonelada de matéria-prima processada em função de perdas no processo.

Por esses motivos, a inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto pode permitir: aumentar a produtividade de etanol; aumentar a eficiência do processo fermentativo; reduzir o uso de insumos (ácido sulfúrico, antibióticos, antiespumantes e outros); usar leveduras selecionadas (alta velocidade de fermentação, pouca formação de espumas, floculante, tolerante a altos teores alcoólicos e outras características desejadas); usar leveduras transgênicas e desenvolvidas com características peculiares para demandas específicas - e, por consequência, resultar em maior produção absoluta por unidade industrial (leveduras estas que podem ser adicionadas ao processo no início da safra e perdurar durante todo o período industrial útil). Também é importante ressaltar que com a esterilização do mosto para a produção de etanol, algumas tecnologias, tais como o reciclo do fermento no processo de produção de etanol de milho, podem se tornar viáveis.

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a redução de carga microbiana em meio de cultivo. Contudo, na indústria de etanol, tradicionalmente, o volume de mosto processado é muito grande, de modo que os métodos tradicionais como: o aquecimento convencional ou o uso de agentes químicos tornam-se muito onerosos, seja pelo tempo de residência do substrato a ser tratado ou pelo custo do agente a ser utilizado.

Entre os métodos alternativos, que podem aliar baixo custo e alta velocidade de tratamento, destaca-se a radiação ionizante: formada por partículas de ondas capazes de remover

os elétrons dos átomos e induzir mudanças químicas nas estruturas celulares dos microrganismos. Estas alterações reduzem ou eliminam eficientemente a população de microrganismos patogênicos e deteriorantes enquanto mantém as qualidades nutricionais e sensoriais do produto tratado (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; DEL MASTRO, 1999; PODADERA, 2007). Segundo Rela (2003), o bombardeamento de um material por feixe de elétrons através dos aceleradores de elétrons é uma das técnicas mais efetivas no processamento por radiação ionizante para se atingir a esterilização do mesmo. Por esses motivos, essa técnica foi selecionada como parte da solução tecnológica proposta neste estudo.

Com a esterilização do mosto é possível aumentar a eficiência da fermentação alcoólica na ordem de 5 a 8%, comparando-se com o que é obtido atualmente. Este ano, um aumento de 6% na produção de etanol, considerando a produção 29,8 bilhões de litros na safra 2021/2022 (CONAB, 2023), representaria um incremento superior a 1,8 bilhão de litros de etanol na produção brasileira. Além disso, esse aumento é possível sem o aumento da área atual de cultivo de matéria-prima. Ademais, para este acréscimo de produção, considerando apenas os níveis tecnológicos empregados atualmente, seria necessária uma área de aproximadamente 282 mil hectares de matéria-prima como a cana, área esta que com a esterilização do mosto poderá ser utilizada para outras finalidades tais como a produção de alimentos, pauta tão importante e discutida no momento, ou para recuperação de reserva legal e/ou áreas de proteção permanentes, as quais são de grande importância para sustentabilidade ambiental da produção e para obter certificação e valorização do etanol brasileiro perante o mercado internacional. Além disso, se for computado que o custo médio para a formação de um hectare de cana está em torno de R\$ 16.156,00 (PECEGE, 2022), esse avanço tecnológico poderia representar a economia de aproximadamente 4,6 bilhões de reais por ano. Por outro lado, ao considerar o preço médio do etanol nos postos de combustíveis no Estado de São Paulo, no mês de março de 2020, na faixa de R\$ 4,52 por litro (ANP, 2022), esse aumento de produção representa a movimentação de mais de 8 bilhões de reais por ano na economia do país. Estes possíveis ganhos de performance no processo são considerados e avaliados neste estudo.

Outro ponto que deve ser destacado, é que a presença de contaminantes ainda impossibilita a produção de um vinho com características microbiológicas semelhantes no decorrer da safra, ou seja, conforme citam Brazzach (1970) e Nolasco Junior (2005), a inativação dos microrganismos presentes no mosto e a condução do processo em condições assépticas permitem a estabilidade no processo produtivo e então algumas técnicas e tecnologias que ainda não são usuais podem se tornar viáveis: caso da redução do tempo de ciclo do fermento e possibilidade de aumento em 10 vezes o percentual de inóculo no processo de produção de etanol de milho por

meio da recuperação das células de levedura (reciclo do fermento). Condição estudada neste trabalho e que tem impacto direto em aumento de produtividade.

Discorridos estes pontos, podemos notar que pelo fato de a produção de etanol a partir de milho em larga escala ser uma tecnologia relativamente recente para a região tropical, há necessidade de se adequar o processo e otimizá-lo para esta realidade. Porém, de forma simultânea, há a necessidade de estudos que disponibilizem tecnologias capazes de agregar valor à linha de produção nas agroindústrias do setor. A eficiência obtida nas fermentações está aquém daquela que deveria ser, uma vez que há grandes perdas em consequência da contaminação microbiana. Ou seja, é possível aumentar a produção de etanol sem que haja aumento na quantidade de matéria-prima processada, o que proporcionaria maior movimentação financeira (da ordem de bilhões de reais por ano) na economia do país e maior sustentabilidade no processo produtivo do etanol – por possibilitar aumento da produção por meio da redução de perdas.

1.2. Aspectos relevantes do trabalho

A otimização de recursos é imperativa nos tempos atuais. Tanto pela sustentabilidade ambiental quanto pela sustentabilidade econômica e social. Esta mesma realidade se aplica ao setor sucroenergético brasileiro, o qual busca cada vez mais elevar o nível de aproveitamento de seu parque industrial. Tanto pela verticalização por meio do aumento de produtividade e eficiência, quanto pelo tempo produtivo por meio da redução de paradas e da extensão do período útil de safra (processamento).

A introdução de grãos de milho às usinas tradicionais de etanol de cana se apresentou como alternativa para extensão do período de processamento destas unidades, durante a entressafra. Mais ainda, o milho se apresentou como matéria-prima exclusiva em projetos de produção de etanol em regiões onde há excedente e dificuldade de escoamento do cereal, os quais trouxeram consigo aplicáveis tecnologias norte-americanas.

A realidade tropical brasileira, entretanto, apresenta certas particularidades que exigem adequações para superação de alguns desafios vivenciados pela cadeia atualmente. A abundância e facilidade de acesso a energias fósseis (carvão mineral e gás natural) tal como é nas indústrias de etanol nos Estados Unidos não é vivenciada pelas destilarias brasileiras. Esta escassez positiva do ponto de vista de balanço energético e sustentabilidade ambiental do processo, pôde ser superada pela utilização de biomassa para suprimento da energia necessária.

Tal biomassa atualmente, é proveniente de cavacos de madeira. O presente projeto, contudo, avalia a utilização da cana energia como fonte de biomassa ao processo de produção de etanol de milho, mesmo nas regiões centrais brasileiras - cinturões tradicionalmente produtores de grãos.

A proposta de certa forma é uma quebra de paradigma, que pode trazer diversos benefícios à cadeia por meio da sinergia entre as matérias-primas em questão. Considera os desafios inerentes desta composição e também suas possíveis soluções respectivas.

Este trabalho propõe a introdução da cana energia como fonte de biomassa para suprimento da energia demandada no processo de produção de etanol de milho.

Para tal, considera o aproveitamento do caldo da cana como fonte de carbono às leveduras durante a fermentação alcoólica e como forma de substituição da água introduzida no processo para hidrólise enzimática do milho. Propõe o tratamento do mosto com feixe de elétrons para inativação dos microrganismos contaminantes carregados ao processo pela cana, pelo milho e por impurezas. E considera a possibilidade de reciclo das células de levedura no processo de fermentação alcoólica, em mosto cujos contaminantes foram inativados por meio da irradiação com feixe de elétrons.

1.3. Objetivos

O presente trabalho considera a proposta de adequações relevantes para a tropicalização do processo de produção de etanol de milho, a partir da utilização da cana-de-açúcar ou cana energia como fonte de bagaço para disponibilização de energia ao processo. Por isso, os objetivos gerais podem ser divididos em três frentes que se complementam.

A inserção da cana como biomassa torna possível o aproveitamento do caldo da cana como forma de substituição da água adicionada na etapa de hidrólise. Sendo assim, o primeiro objetivo geral foi a verificação da viabilidade técnica de hidrólise do milho em caldo de cana e posterior fermentação do mosto obtido.

Considerando as evidentes perdas de eficiência e produtividade da fermentação alcoólica em função da contaminação microbiológica existente nos mostos utilizados nas usinas e destilarias, a autossuficiência em energia alcançada a partir da inserção da cana como biomassa para a disponibilização de energia ao processo tornou razoável a possibilidade de introdução e operação de uma fonte aceleradora de elétrons na linha de produção de etanol - a fim de irradiar o mosto: alternativa para assepsia e inativação de microrganismos contaminantes. Portanto, o segundo

objetivo foi a avaliação da possibilidade de inativação de microrganismos contaminantes presentes no mosto por meio do tratamento com feixe de elétrons e mensuração de seus efeitos sobre a eficiência e produtividade da fermentação alcoólica.

A partir da inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto e condução do processo em sistema fechado e descontaminado, pode ser considerada a possibilidade de recuperação da linhagem específica de levedura inoculada para utilização subsequente ao primeiro ciclo de fermentação (reciclo do fermento). Desta forma, o terceiro objetivo foi avaliar a viabilidade técnica de reciclo da levedura utilizada na fermentação de mosto irradiado com feixe de elétrons.

Objetivos específicos:

- a) Avaliar a fermentação alcoólica de mosto obtido a partir da hidrólise de milho em caldo de cana quanto à eficiência e produtividade;
- b) Validar a dose mais adequada de feixe de elétrons para inativação dos microrganismos presentes no mosto;
- c) Investigar os efeitos do tratamento do mosto com feixe de elétrons sobre o aumento da eficiência e produtividade da fermentação alcoólica;
- d) Investigar a possibilidade de reciclo da levedura no processo de produção de etanol a partir de milho hidrolisado em caldo de cana e conduzido por meio da fermentação de mosto irradiado com feixe de elétrons;
- e) Verificar a sustentabilidade energética, ambiental e econômica do processo de produção de etanol a partir de milho hidrolisado em caldo de cana e conduzido por meio da fermentação de mosto irradiado com feixe de elétrons.

1.4. Hipótese

Introduzindo a cana energia como fonte de biomassa para disponibilização de energia ao processo de produção de etanol de milho, é possível utilizar o caldo de cana em substituição à água adicionada na etapa de hidrólise, bem como tornar o processo autossuficiente em energia - a ponto de possibilitar a introdução de um acelerador de elétrons para irradiação do mosto e inativação dos microrganismos contaminantes.

A partir da inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto e condução do processo em sistema livre de recontaminação, torna-se possível a condução do processo com

linhagem específica de levedura e reciclo desta mesma linhagem ao longo da safra de produção de etanol de milho - sem perdas de eficiência e produtividade da fermentação alcoólica.

1.5. Contribuições originais

Como contribuições originais tem-se:

- i. Introdução de um modelo misto de hidrólise de grãos de milho junto ao caldo de cana, em substituição à água. Trata-se da produção de etanol a partir de milho hidrolisado em caldo de cana, por meio de um sistema unificado de processamento - desde a etapa de hidrólise até a geração do produto final;
- ii. Aplicação de feixe de elétrons como forma de possibilitar aumento da eficiência e produtividade da fermentação alcoólica - por meio da inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto misto e consequente redução das perdas por estes causadas;
- iii. Introdução do reciclo das células de levedura em processo de produção de etanol a partir de milho – a partir da inativação de microrganismos contaminantes presentes no mosto e condução do processo livre de recontaminação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

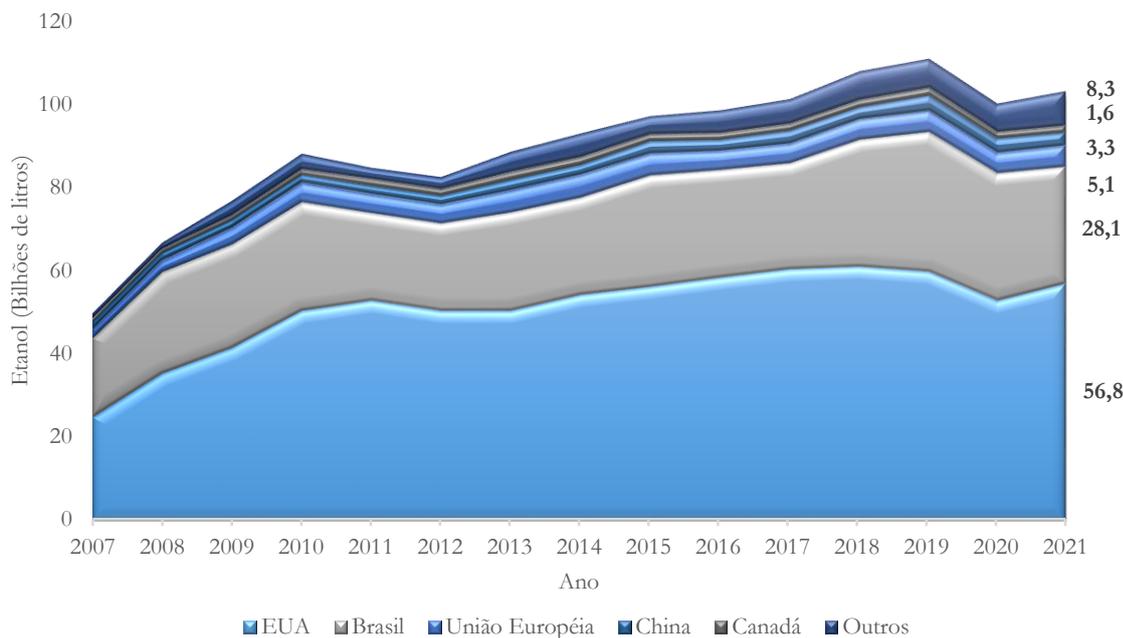
2.1. Etanol: panorama global

Durante a COP21 (21ª Conferência das Partes), governos de cerca de 195 países se reuniram em Paris para buscar um acordo sobre mudança global do clima. Cada um dos países foi instado a apresentar sua ambição para redução de emissões domésticas de gases de efeito estufa (GEE) com o objetivo de limitar o aumento da temperatura no globo terrestre a um máximo de 2°C até 2100, sendo que o Brasil se comprometeu a reduzir, até 2030, as emissões de GEE em 43% em relação aos níveis de 2005 (EPE, 2016). Isso nos mostra o quão necessário são os investimentos em bioenergia, a fim de atender a demanda energética de forma renovável e com sustentabilidade, e atender também as propostas de redução da emissão de gases e descarbonização. A produção de etanol atende a estas exigências e se encaixa perfeitamente neste cenário.

Mundialmente, a demanda por energia tende a aumentar cerca de 32% entre os anos de 2022 e 2050, sendo que os setores industrial e de transporte representarão o maior crescimento em termos de demanda por energia – este último responsável por quase 25% de todas as emissões de GEE atualmente (IEA, 2019).

A tendência é que o consumo de energia obtida a partir de fonte renováveis seja mais representativa até 2050, alcançando 28% do total (IEA, 2019). Esse fator está principalmente relacionado às propostas de adequação da matriz energética de muitos países, fruto de acordos internacionais conforme citado - em defesa da redução de emissões de gases do efeito estufa e contenção do aquecimento global. Basta lembrar que o uso de etanol hidratado emite até 90% menos CO₂ que o combustível fóssil equivalente (UNICA, 2021).

Figura 1. Principais países produtores de etanol e suas respectivas contribuições quanto à produção mundial do biocombustível.



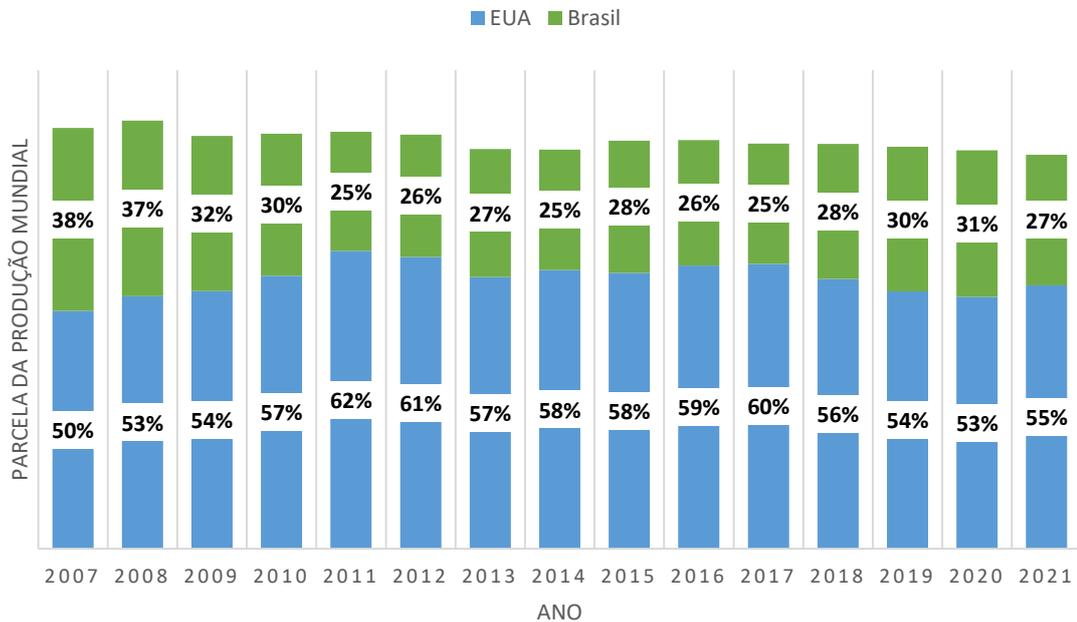
Fonte: Elaborado pelo autor (dados de RFA, 2022 e EIA, 2022).

Entre 2012 e 2019, a produção mundial de etanol aumentou em aproximadamente 22% (OECD/FAO, 2020). Os analistas da consultoria Market Research (2022) estimam um crescimento de 14%a.a. do mercado global de etanol entre 2020 e 2025; analistas da consultoria Precedence Research (2022) estimam um crescimento de 5,2%a.a. entre os anos de 2021 e 2030.

O aumento da demanda por etanol pode ser atribuída majoritariamente pelas medidas de incentivos à adição de bioetanol aos combustíveis, de forma a reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE) e aumentar eficiência de combustão em motores veiculares. Em muitos países da Europa e outras regiões do mundo já se tornou mandatória a utilização de combustíveis E10 (contendo 10% de etanol anidro). O etanol é mais barato e se mostra como uma alternativa ambientalmente mais adequada para substituição de combustíveis derivados do petróleo (MARKET RESEARCH, 2022).

A produção global poderá alcançar 140 bilhões de litros até 2029. Cerca de 84% dessa demanda será atendida pelos países em desenvolvimento - ao menos 50% deste volume estimado terá o Brasil como origem (OECD/FAO, 2020). Em 2020, a produção mundial de etanol foi de aproximadamente 120 bilhões de litros e, desse total, Estados Unidos e Brasil – maiores produtores globais, responderam respectivamente por 53% e 31% deste volume (RFA, 2021).

Figura 2. Contribuição dos países Estados Unidos da América e Brasil sobre a produção mundial de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de RFA, 2022; e EIA, 2022).

Simultaneamente, estes dois países também são responsáveis pelo consumo de 70% de todo o etanol produzido mundialmente. E, de acordo com as projeções da FAO para 2029, tal nível de participação deve permanecer. Além destes, a China e a União Européia apresentam demanda crescente por etanol. Em 2019, este país e esta união econômica demandaram 10,6 e 6,7 bilhões de litros, respectivamente (OECD/FAO, 2020).

2.1.1. Panorama norte-americano

Responsável por mais de 53% da produção de etanol global, correspondente a 64 bilhões de litros produzidos em 2020, os Estados Unidos da América se apresentam como um case de sucesso: exemplo de estratégia e superação na implantação da cadeia (RFA, 2021).

A fim de reduzir a dependência energética de importação de petróleo, os Estados Unidos traçaram estratégia para cumprimento da meta de aumento da produção e consumo do biocombustível produzido em seu próprio território (RFA, 2021).

Na década de 1970, a Organização dos Países Árabes Exportadores de Petróleo (OAPEC) reduziu o fornecimento de petróleo para países como os Estados Unidos e aliados, Japão e Europa Ocidental – semelhante ao que vem ocorrendo com a Europa em dependência às fontes energéticas

da Rússia no atual conflito Rússia x Ucrânia. Tal cenário, colocou o etanol em evidência como fonte energética alternativa (SMITH, 1996).

Na década seguinte, o Programa de Etanol foi implantado nos Estados Unidos, com o objetivo de implementar uma nova alternativa de combustível e estabilizar o preço do milho. Em meados de 1990, foi também criado o “*Clean Air Act*” - o qual instituiu um conjunto de padrões de qualidade do ar nas grandes cidades norte-americanas (MELO, 2018).

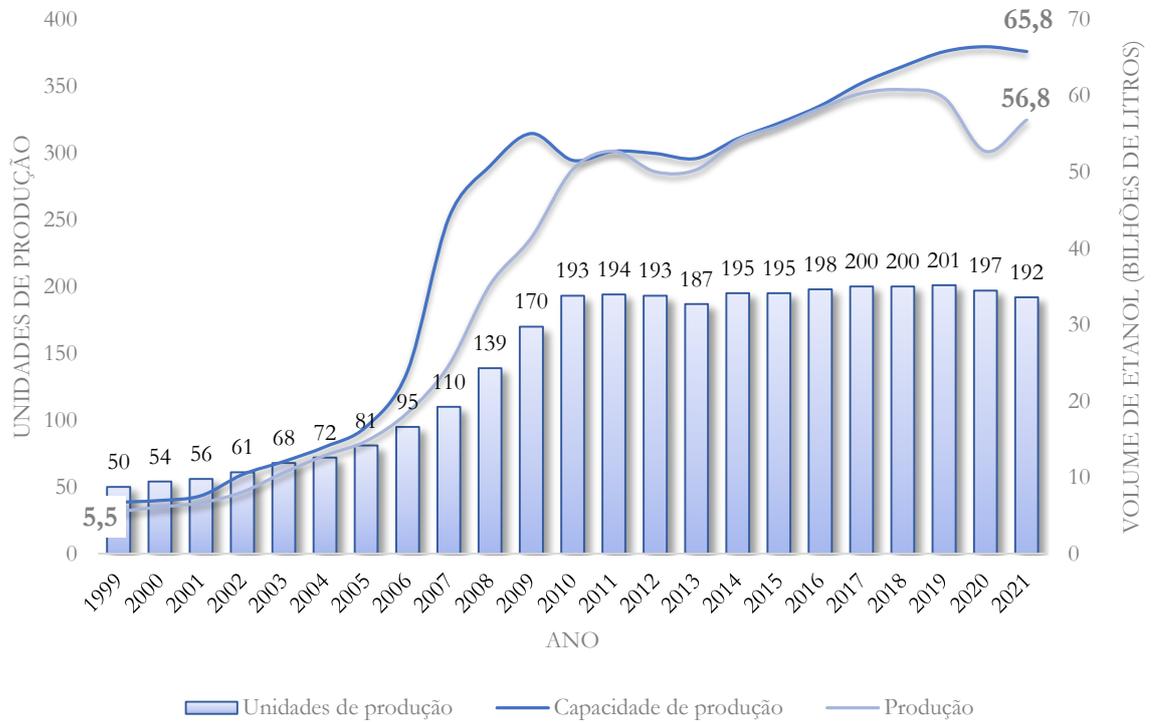
À época, os EUA também faziam uso do éter metil-terc-butilico (MTBE) para redução das emissões de monóxido de carbono provenientes da combustão dos veículos automotores. Entretanto, ao constatar ser este um composto também poluidor, no início dos anos 2000 substituíram-no pelo etanol a fim de minimizar danos ambientais (CDC, 2017).

O plano de ação norte-americano quanto ao desenvolvimento da cadeia de etanol de milho é um exemplo de política nacional que contou com instrumentos de incentivo e fomento para apoiar um setor estratégico de sua economia. De forma a ilustrar tal evolução, faz-se necessário destacar que no ano 2000, os Estados Unidos produziram cerca de 6,2 bilhões de litros de etanol de milho e, cumprindo a estratégia e o objetivo de rápido aumento de produção, até 2010 aumentaram sua produção anual para aproximadamente 49,3 bilhões de litros (RFA, 2021).

As políticas públicas de incentivo à produção de etanol de milho foram essenciais para o sucesso deste projeto no país, portanto. Crédito fiscal para a produção de etanol foi criado ao final da década de 1990, sendo depois estendido para outras formas de bioenergia; programas de subsídio contribuíram para o aumento da produção entre 2006 e 2011; estímulo ao setor, por meio da solicitação de adição de etanol à gasolina - *U.S. Renewable Fuels Standard* (RFS), também incentivaram a produção a partir de 2005; disposições e meta mais arrojada de aumento de produção e consumo de biocombustíveis até 2022 foi estabelecida no ano 2007, por meio da *Energy Independence and Security Act* (EISA) - ou *U.S. Renewable Fuels Standard 2* (RFS2) (MELO, 2018; RFA, 2021).

Os investimentos americanos para desenvolvimento desta política é um fato que chama atenção daqueles que acompanham a evolução do setor. Torna-se evidente o esforço e busca pela segurança energética. Com sustentabilidade ambiental, também (RFA, 2021). A Figura 3 apresenta a evolução da quantidade de plantas industriais norte-americanas de produção de etanol, bem como a evolução da produção e capacidade de produção ao longo dos anos.

Figura 3. Evolução da produção e capacidade de produção norte-americana de etanol, bem como a quantidade de plantas industriais em operação.

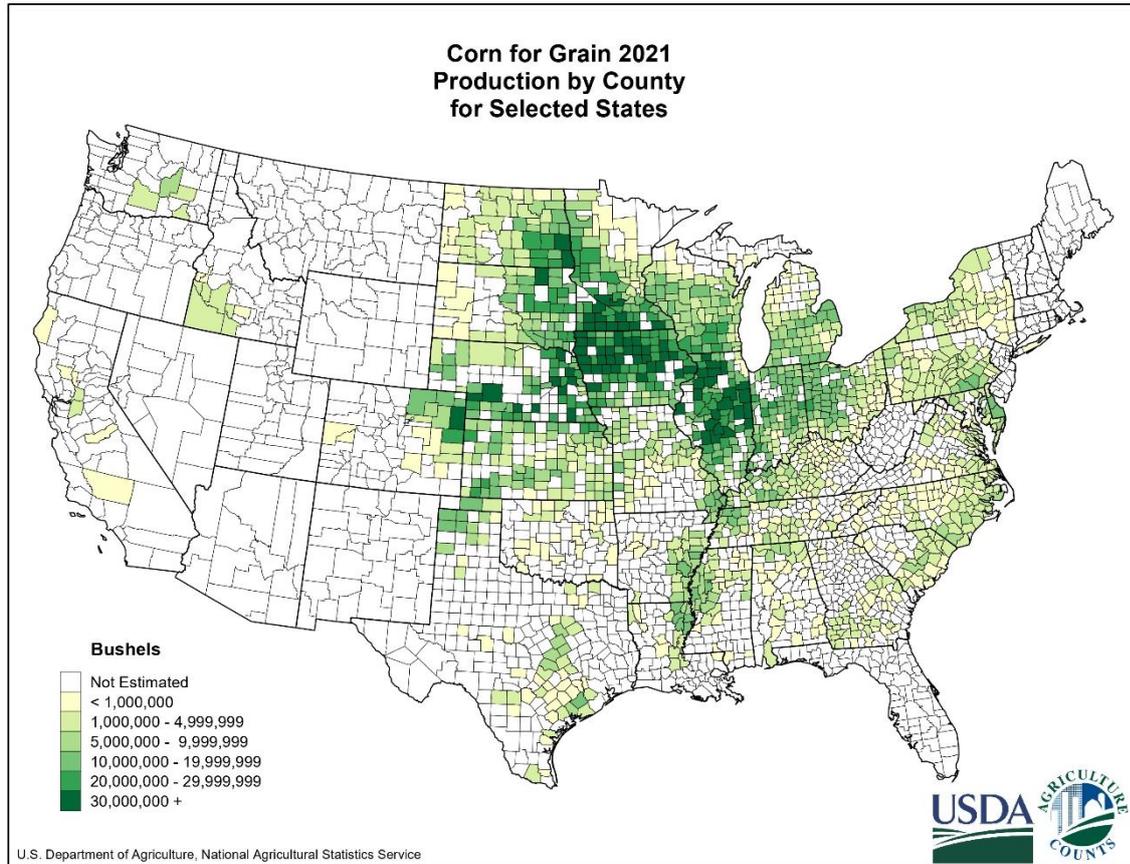


Fonte: Elaborado pelo autor (dados de RFA, 2021; e EIA, 2022).

Hoje, a tecnologia norte-americana de produção de etanol é referência, porém desenvolvida para a realidade e particularidades norte-americanas. Segundo o *United States Environmental Protection Agency*, o etanol de milho produzido nos moldes convencionais norte-americano reduz as emissões de GEE em 21% - em relação a seu combustível fóssil equivalente. O etanol brasileiro de cana-de-açúcar, por sua vez, principalmente pelo fato de ter a biomassa de cana (bagaço) como fonte de energia ao processo de produção, reduz tais emissões em 61% - o que o caracteriza como biocombustível avançado (MELO, 2018; RFA, 2021; EPA, 2022).

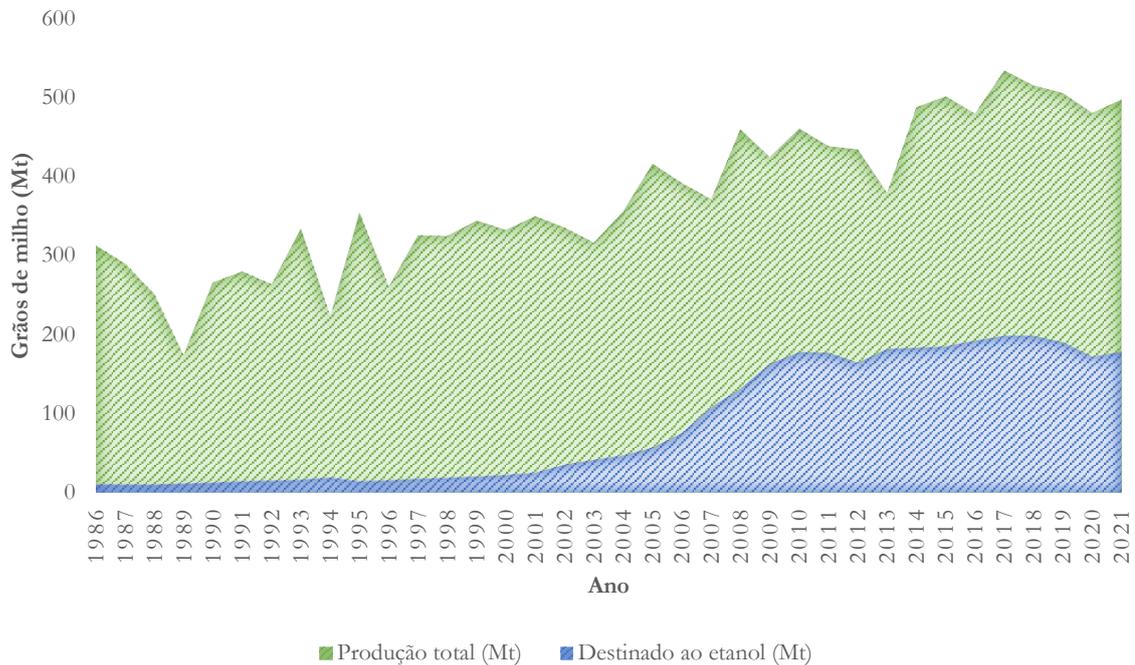
O etanol a partir de milho continua em destaque nacionalmente e, no presente, cerca de um terço da produção total de grãos do país é destinada à produção do biocombustível. Pouco mais de 170 milhões de toneladas do grão foram destinadas à produção de etanol norte-americano em 2020, montante 68% superior à produção total brasileira do cereal neste mesmo período (USDA, 2022a).

Figura 4. Região norte-americana de produção de milho (“*corn belt*” ou cinturão do milho).



Fonte: USDA, 2022b.

Figura 5. Produção norte-americana de milho e parcela da produção do cereal destinada à produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de USDA, 2022a).

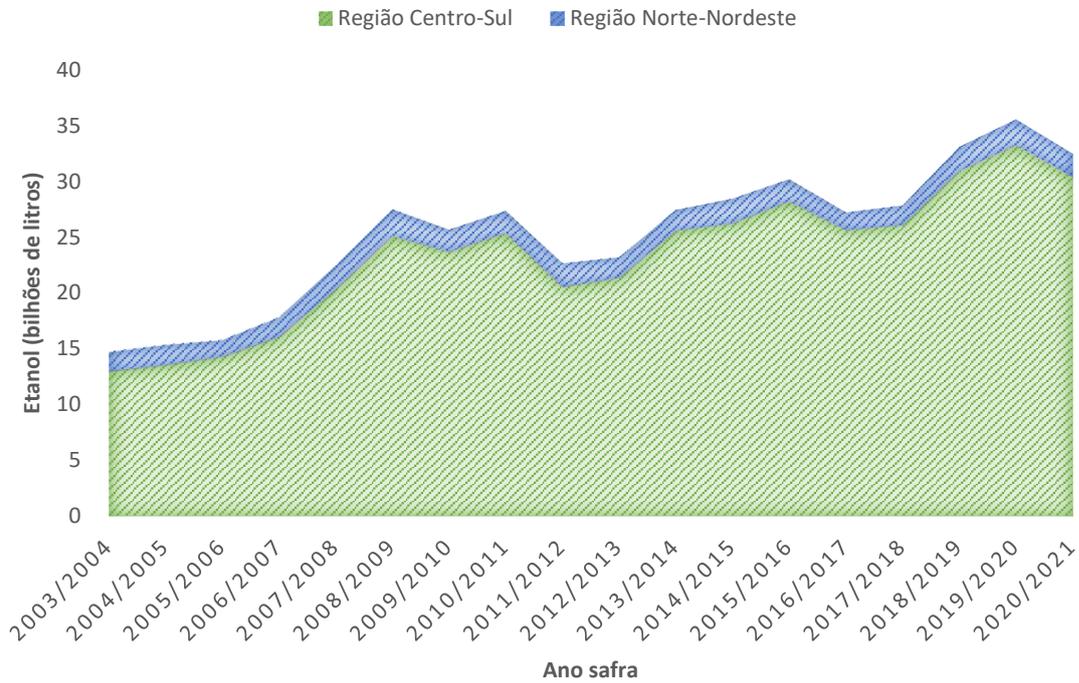
2.1.2. Panorama brasileiro

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e de etanol a partir de cana-de-açúcar. O incentivo à expansão do etanol na matriz energética e o forte incentivo à produção industrial teve início nos anos 1970 – como resposta estratégica à primeira crise do petróleo. Visou à redução da dependência do Brasil às importações de energia e da exposição do país às variações do preço internacional do petróleo.

Desenvolveu-se uma cadeia produtiva bem elaborada. À época, por meio de incentivos, pesquisa e formação de capital humano - também exemplar. Como resultado, a participação do etanol no consumo de combustíveis líquidos de ciclo Otto saiu de 14,5%, em 1980, para 42,5% em 2020. Substitui a gasolina (combustível fóssil equivalente) em parte da demanda por combustíveis (etanol hidratado), ou a complementa (etanol anidro) em 27,5% na gasolina comum e 25% na gasolina aditivada (EPE, 2021).

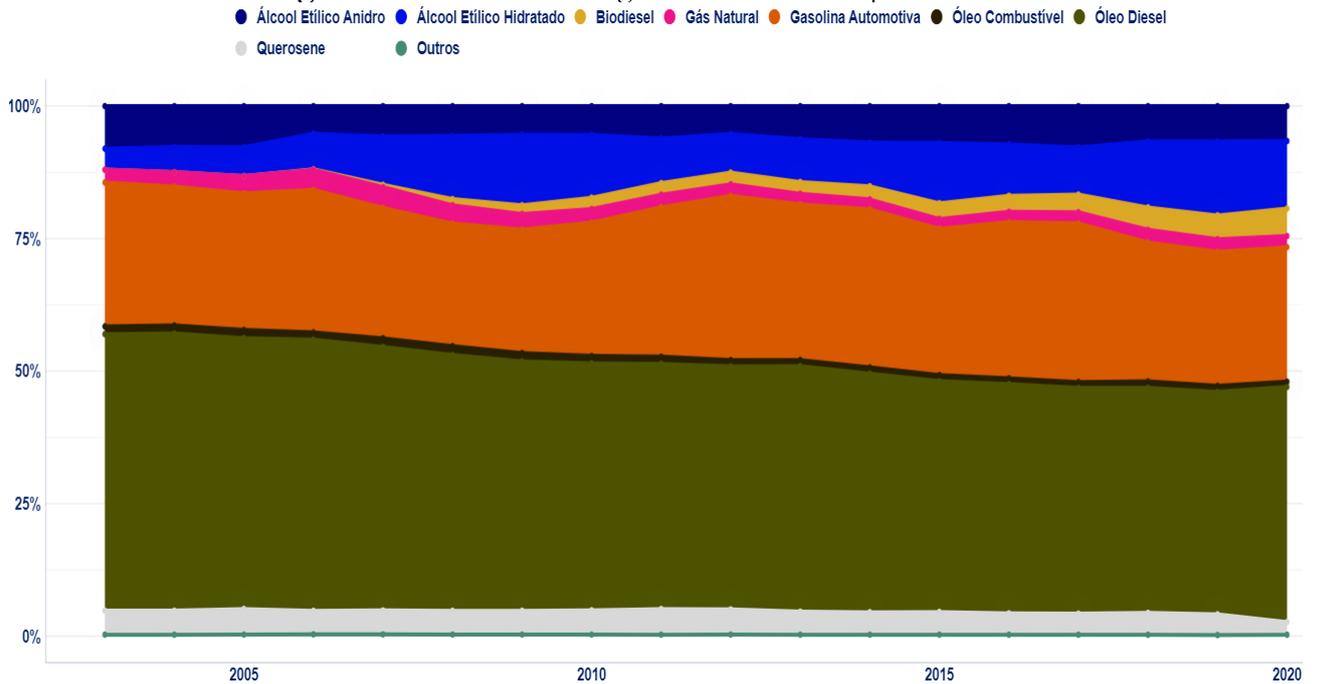
A produção brasileira de etanol foi duplicada nos últimos 15 anos. O lançamento da tecnologia *Flex* em 2003 fortaleceu ainda mais a participação deste como biocombustível, além dos efeitos de preços do barril de petróleo e exigências relacionadas à sustentabilidade ambiental – o que fortaleceu a demanda (MELO; SAMPAIO, 2014; UNICA, 2021; CONAB, 2022). O comportamento da oferta de etanol nacional entre os anos de 2003 e 2020 pode ser observado na Figura 6.

Figura 6. Evolução da produção brasileira de etanol entre os anos 2003 e 2020.



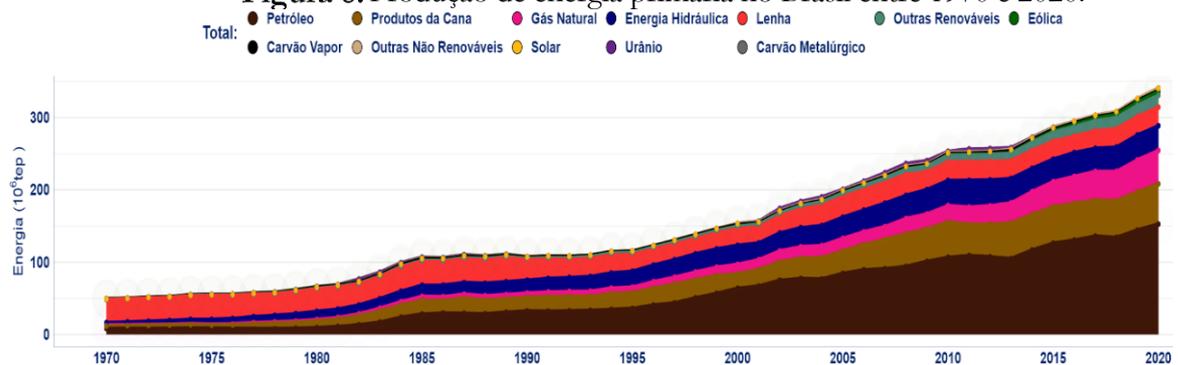
Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

Também consequência do lançamento dos automóveis com tecnologia *Flex*, o setor de transporte rodoviário teve a parcela correspondente ao consumo de etanol elevada de 13% para 20% do consumo total de energia, conforme Figura 7 (EPE, 2021).

Figura 7. Consumo de energia no setor de transportes.

Fonte: EPE, 2021.

A elevada demanda de energia no setor de transportes (31% da energia final em 2020) torna importante a participação do etanol na matriz energética nacional (EPE, 2021). Segundo o Balanço Energético Nacional, os produtos derivados de cana-de-açúcar contribuíram com 16% da produção de energia primária em 2020 (Figura 8).

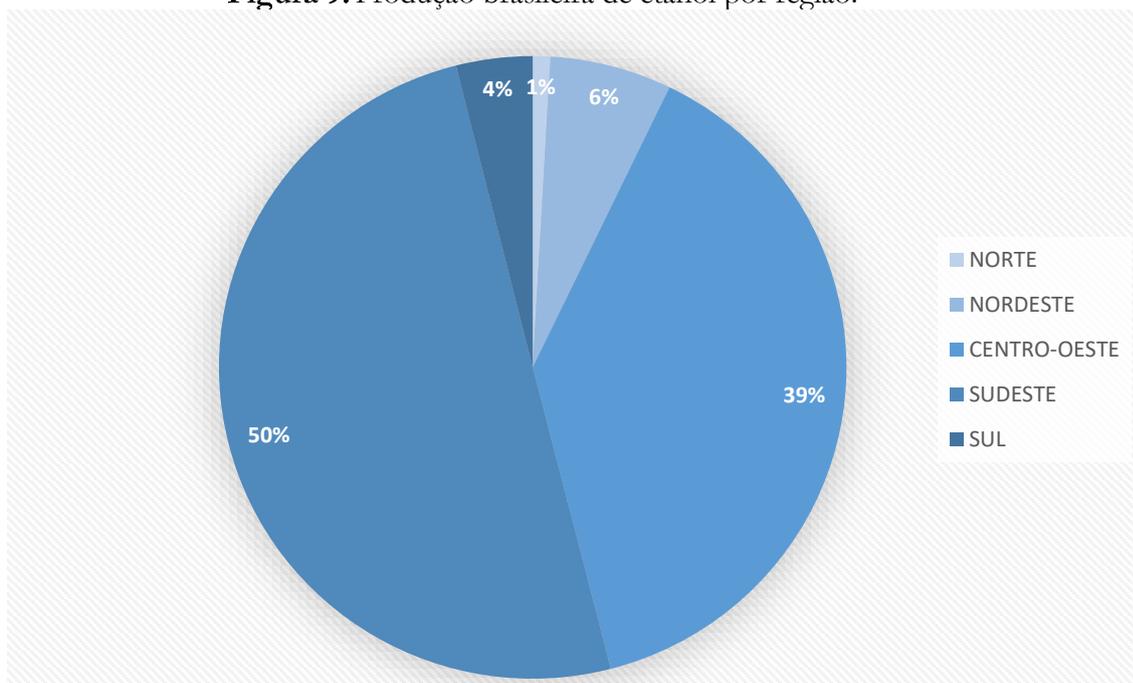
Figura 8. Produção de energia primária no Brasil entre 1970 e 2020.

Fonte: EPE, 2021.

De acordo com a ANP (2021a), o crescimento médio da produção brasileira de etanol nos últimos nove anos foi de 2,6% ao ano. Estima-se aumento na produção brasileira de etanol, de 32,7 bilhões de litros produzidos em 2020 (UNICA, 2021) para 47 bilhões de litros em 2029 (EPE, 2020).

A produção nacional é majoritariamente proveniente da região Centro-Sul - a qual produziu 30,4 bilhões de litros de etanol em 2020 (UNICA, 2021). Sendo que as regiões Sudeste e Centro-Oeste respondem por aproximadamente 50% e 39% da produção nacional (Figura 9), respectivamente (CONAB, 2022).

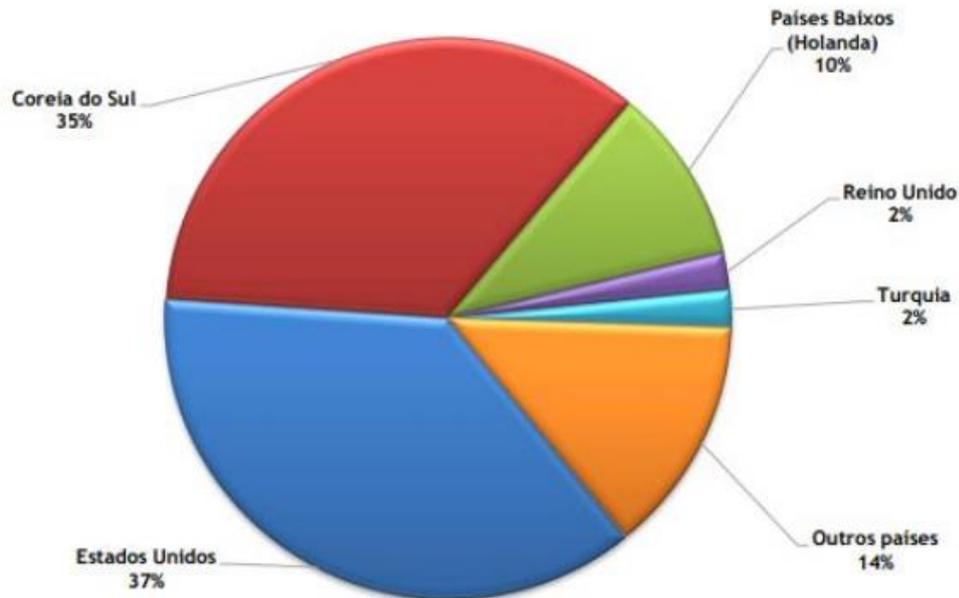
Figura 9. Produção brasileira de etanol por região.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

No *ranking* mundial de países produtores de etanol, o Brasil está posicionado em segundo lugar e contribuiu com 30% da produção global em 2020 (RFA, 2021). Em 2020, o país exportou 2,69 bilhões de litros de etanol aos Estados Unidos da América, Coreia do Sul, Holanda, Japão e Nigéria (MAPA, 2021).

Figura 10. Principais países importadores de etanol brasileiro.



Fonte: MAPA, 2021 (dados 2020).

Brasil e Estados Unidos da América, embora maiores produtores mundiais de etanol, comercializam grandes volumes do produto entre si. Os Estados Unidos se apresentam sistematicamente como o maior importador de etanol brasileiro. Assim como o Brasil que, embora segundo maior produtor global de etanol e maior exportador do biocombustível, também se apresenta como grande importador de etanol dos Estados Unidos da América (RFA, 2021; EPA, 2022; COMEX STAT, 2022).

Tal dinâmica de importações e exportações deste mesmo produto entre os dois maiores produtores globais pode ser explicada. No Brasil, há uma oscilação sazonal nos preços e oferta do biocombustível em função dos períodos de safra (maior oferta e menores preços) e entressafra (ociosidade da indústria e maiores preços) da cana-de-açúcar. Na entressafra, portanto, se torna atrativa a importação do etanol para atender à demanda (majoritariamente proveniente dos EUA), muitas vezes a preços inferiores aqueles praticados durante a entressafra no mercado nacional (NOGUEIRA; COSTA, 2012; COMEX STAT, 2022).

Por outro lado, o etanol brasileiro possui qualidade ambiental superior em relação ao etanol de milho norte-americano, e por isso torna-se o principal fornecedor de etanol aos EUA (destino de 63% do etanol brasileiro exportado) – a fim de favorecê-los quanto ao alcance das metas de biocombustíveis na matriz energética e descarbonização, estabelecidas pelo governo norte-americano (NOGUEIRA; COSTA, 2012; COMEX STAT, 2022).

Tradicionalmente, o etanol brasileiro é proveniente da cana-de-açúcar. Até o ano de 2014, foi produzido quase que exclusivamente por meio da fermentação de caldo extraído da cana. Porém, cenários regionais de excedente de milho e infraestrutura logística e de armazenagem ainda aquém do necessário, têm favorecido investimentos em plantas de produção de etanol de milho (IMEA, 2021; MAPA, 2021) – conforme descrito no próximo item.

2.2. Etanol de milho no Brasil

2.2.1. Contexto nacional

O etanol é um álcool formado pela cadeia simples de dois carbonos (C_2H_5OH), por isso também mencionado como álcool etílico. O etanol é miscível em água e em grande parte dos solventes orgânicos. Suas principais propriedades são apresentadas na Tabela 1.

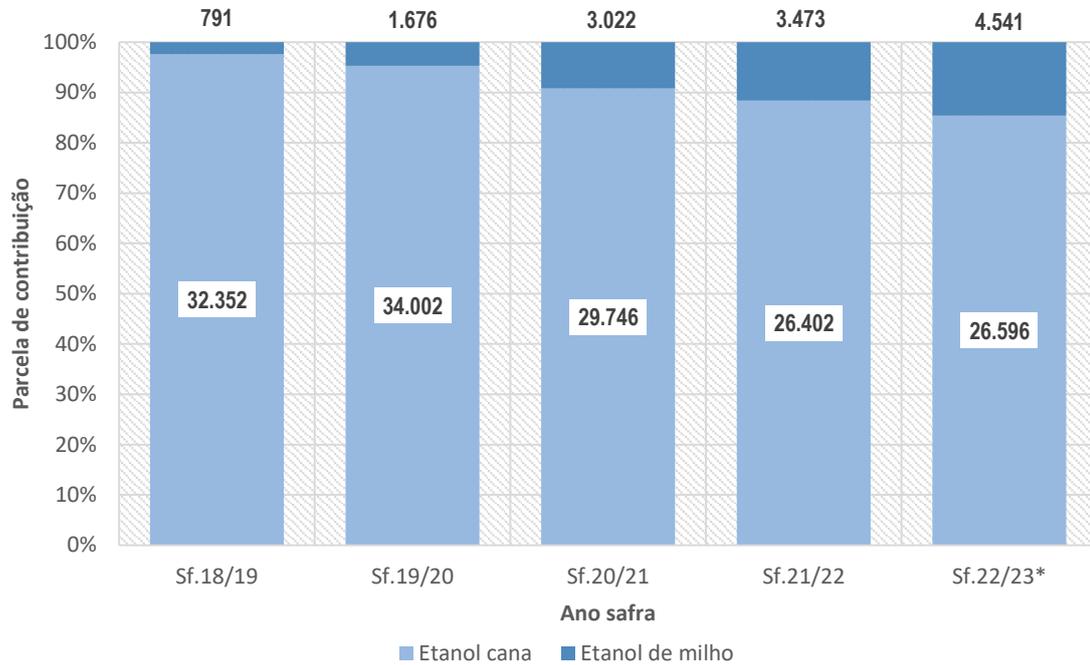
Tabela 1. Principais propriedades do etanol.

Propriedade	
Fórmula	C_2H_5OH
CAS nº	64-17-5
Aparência	Líquido incolor
Massa molar	46,07
Ponto de ebulição (°C)	78,2
Densidade ($g\ cm^{-3}$, 20°C)	0,78945
Viscosidade (mPa.s, 20°C)	1,2

Fonte: Adaptado pelo autor (informações de WYMAN e HINMAN, 1990).

A produção de etanol brasileira tem sido cada vez mais dividida entre matérias-primas, a partir da introdução do milho como alternativa à cana-de-açúcar. Em 2020, o grão foi responsável por mais de 9% da produção nacional de etanol (CONAB, 2021).

Figura 11. Evolução da produção brasileira de etanol de acordo com as matérias-primas milho e cana-de-açúcar (em milhões de litros).

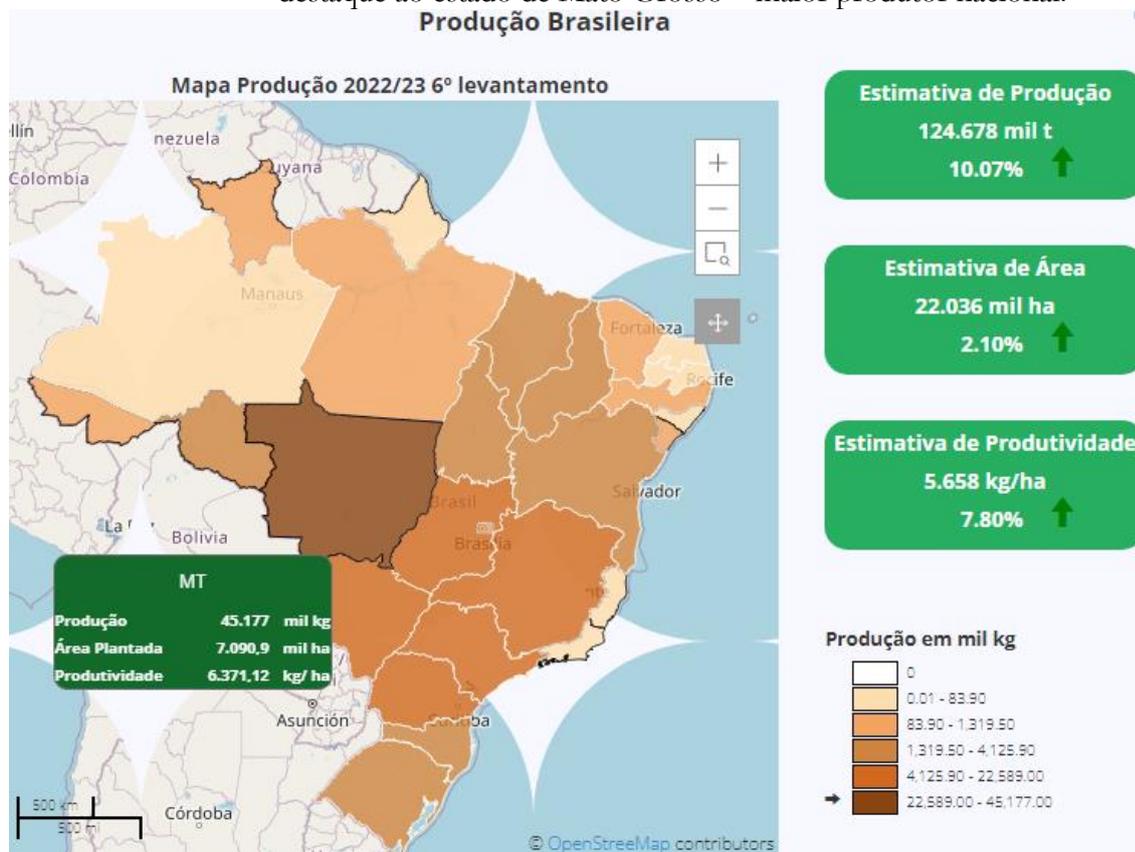


Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

*Volume de produção estimado para a safra 2022/23.

Oportunidades específicas de superprodução nos cinturões brasileiros de grãos fizeram deste cereal uma excelente opção como matéria-prima para a produção de etanol (BORTOLETTO, 2015).

Figura 12. Produção de milho nos estados brasileiros, com destaque ao estado de Mato Grosso – maior produtor nacional.

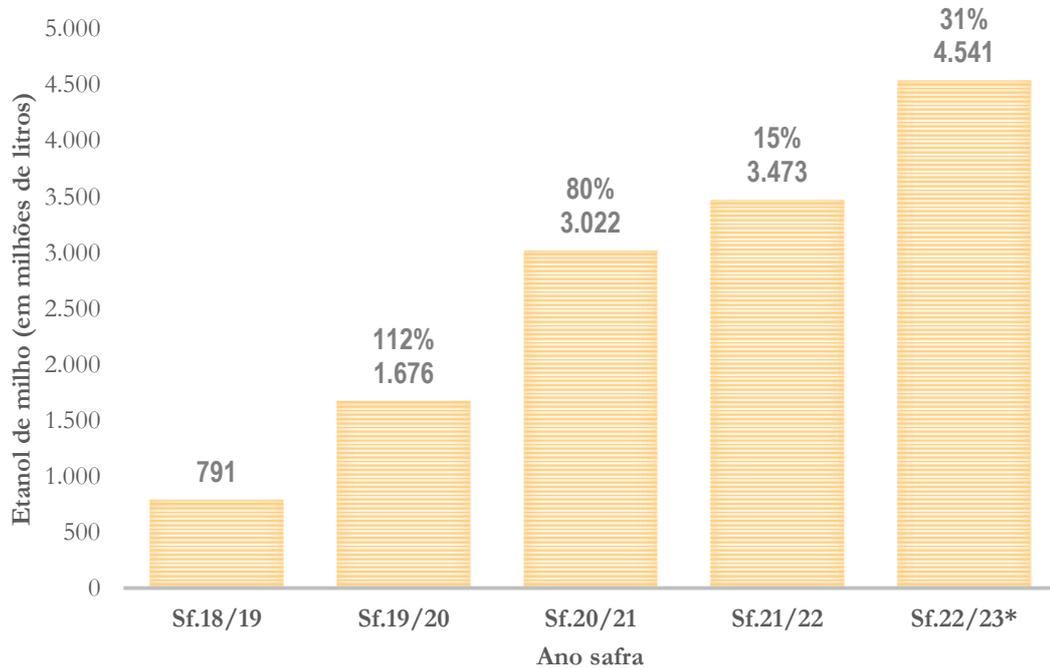


Fonte: CONAB, 2023.

Tal cenário, aliado à possibilidade de aproveitamento da infraestrutura de usinas de cana-de-açúcar em períodos de entressafra e ao desenvolvimento de novas plantas industriais (integradas ou autônomas) com elevada viabilidade técnica e econômica, incentivou o investimento e produção de bioetanol a partir do cereal que, sem esta alternativa, teria dificuldade de escoamento (IMEA, 2021).

A utilização de milho para a produção de etanol tem sido crescente no Brasil. A produção de etanol de milho na safra 2021/2022 (Figura 13) superou 3,4 bilhões de litros (CONAB, 2022) e a projeção da UNEM (2020) para 2028 é de 8 bilhões de litros.

Figura 13. Produção brasileira de etanol de milho e respectivos incrementos anuais sobre a produção.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

*Volume de produção estimado para a safra 2022/23.

Tal resultado, lança o milho como importante matéria-prima para a produção de energia limpa e renovável, juntamente com a tradicional cana-de-açúcar. Se considerarmos os 45 bilhões de litros de etanol total estimados por EPE (2020) para 2028, o etanol de milho representará aproximadamente 18% da produção nacional de etanol (UNEM, 2020).

Tabela 2. Produção brasileira de etanol de milho.

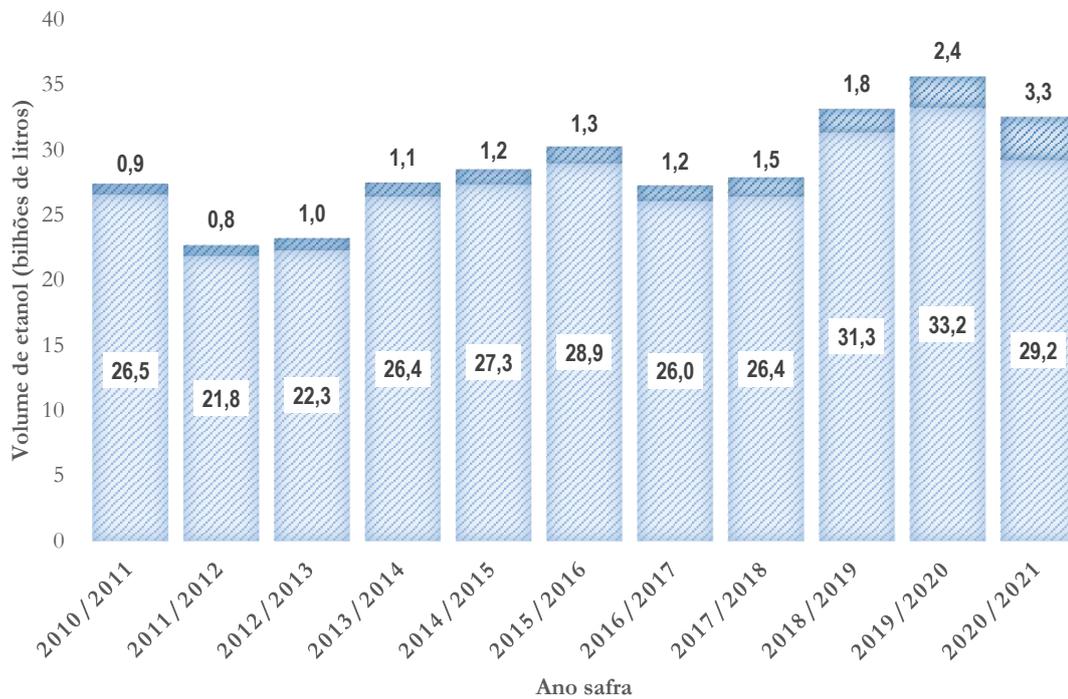
Unidade federativa	Etanol (m³)
Rondônia	(7.200) ¹
Mato Grosso	2.982.000
Mato Grosso do Sul	(714.480) ²
Goiás	378.445
Paraná	112.773
Brasil	3.473.218³

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

*Nota: Os volumes de produção informados referem-se à safra 2021/22, contudo: ¹Volume de etanol de milho produzido pelo estado de Rondônia na safra 2020/21, uma vez que o volume produzido pelo mesmo estado na safra 2021/22 não foi informado pela CONAB; ²Produção de etanol de milho estimada pela CONAB para a safra 2022/23; ³Produção total referente ao ano safra 2021/22.

O estado de Mato Grosso lidera a produção do grão e do biocombustível obtido a partir do grão, responsável por 79,1% da produção nacional deste último em 2020/2021 (MAPA, 2021). Esta condição torna sua produção significativa ante ao volume nacional. A evolução da produção brasileira de etanol entre 2010 e 2020 pode ser observada na Figura 14, com destaque para a produção no estado de Mato Grosso.

Figura 14. Representação da produção brasileira de etanol, com destaque para o volume produzido no estado de Mato Grosso.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

Seguindo esta mesma tendência de aumento da produção de etanol a partir do cereal, está previsto para o ano de 2023 a inauguração da segunda unidade de produção no estado de Mato Grosso do Sul. A estimativa é que este estado se torne o segundo maior polo nacional de produção de etanol de milho (UNEM, 2023).

Assim, além da absorção de um excedente de grãos produzidos nestes estados, o fato da produção regional de etanol ser maior que o consumo local faz com que o direcionamento de parcela da produção de milho para processamento e fabricação de etanol também gere divisas e equalize a balança comercial no âmbito estadual (IMEA, 2021).

O segmento de etanol de milho, portanto, mobilizou e continua mobilizando grandes investimentos e empresas do agronegócio, as quais acompanham com atenção a viabilidade de instalação e operação de usinas de etanol de milho. Deve-se considerar, entretanto, que todo o pacote tecnológico de conversão de milho em etanol e coprodutos é proveniente da experiência norte-americana, onde foi amplamente desenvolvido e aperfeiçoado (MELO, 2018; RFA, 2021).

O processo de produção nos Estados Unidos é caracterizado pelo processamento de milho primeira safra e utilização de fontes de energias fósseis, majoritariamente. As condições tropicais do Brasil, entretanto, diferem-se por meio de vantagens como a disponibilidade de fontes

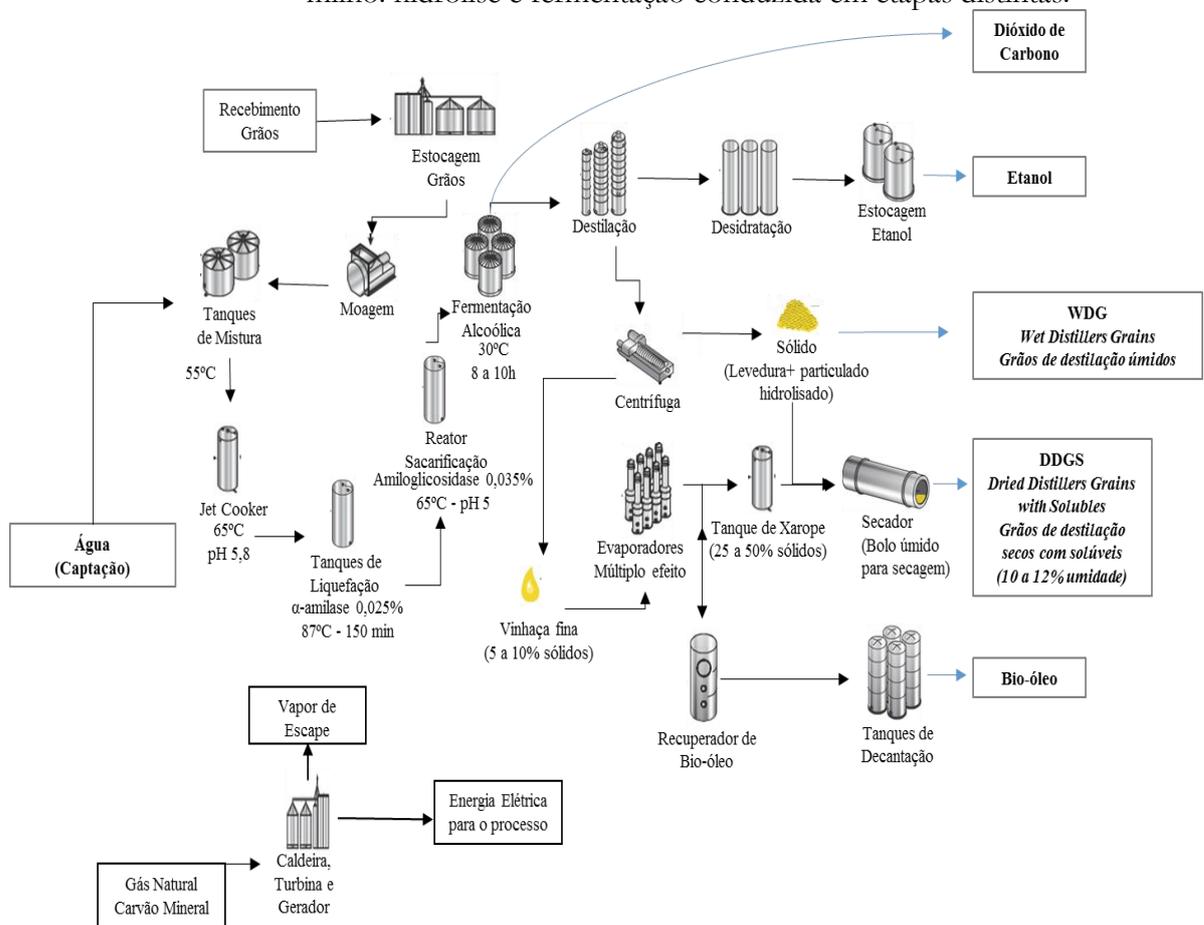
renováveis de energia e de excedentes de milho produzidos como cultura de cobertura e complementar a uma cultura principal – milho safrinha (MOREIRA *et al.*, 2020), o que pode demandar adequações e melhorias para atendimento à realidade local.

Além disso, o potencial regional de cultivo de culturas agroenergéticas, tal como é a cana energia, permite não apenas alimentar as destilarias de etanol de milho da região, mas também gerar excedentes de energia elétrica nas unidades industriais de forma a reverter a retração da produção de energia elétrica observada nos estados cinturões na produção de cereais. O estado de Mato Grosso apresentou redução de 13,2% na produção de energia elétrica entre os anos 2019 (26,8 TWh) e 2021 (23,2 TWh), sendo que a macrorregião centro-oeste apresentou redução de 12,8% no mesmo período – passando de 78,8 TWh para 68,7 TWh de energia elétrica gerada anualmente (EPE, 2022).

2.2.2. Cadeia do etanol de milho

A Figura 15 representa a visão global do processo convencional de produção de etanol de milho, com hidrólise e fermentação conduzidas em momentos distintos (“*Separate Hydrolysis and Fermentation*”, SHF) - configuração que favorece o processo quanto à possibilidade de operar com temperaturas mais próximas dos parâmetros ideais para cada enzima e etapa de processo (KRISHNAN *et al.*, 2000).

Figura 15. Fluxograma do processo convencional SHF (“*Separate Hydrolysis and Fermentation*”) de produção de etanol de milho: hidrólise e fermentação conduzida em etapas distintas.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de KRISHNAN *et al.*, 2000; KELSALL e LYONS, 2003; NOVOZYMES, 2019; ICM, 2021).

O processo ilustrado representa a tecnologia tradicionalmente empregada nas usinas norte americanas de etanol de milho em sistema SHF. Deve-se notar que fontes fósseis disponibilizam energia ao processo, tais como carvão mineral e gás natural. Entretanto, na realidade tropical brasileira, fontes de biomassa podem ser utilizadas para alimentar o processo industrial, tais como o cavaco de madeira e/ou bagaço de cana-de-açúcar.

Além da matéria-prima (grãos) e fonte de energia (biomassa), os insumos (químicos, biológicos, equipamentos e outros) e as estruturas destinadas ao armazenamento, logística e comercialização dos produtos também compõem a cadeia de etanol de milho (KRISHNAN *et al.*, 2000; MIZIK, 2021; NEVES *et al.*, 2021). A disponibilidade de enzimas específicas utilizadas no processo é parte essencial da cadeia de valor do etanol de milho (NOVOZYMES, 2019).

Para esta cadeia, as empresas norte-americanas *ICM Inc.* e *Fluid Quip Technologies* são responsáveis por grande parte dos projetos de etanol de milho instalados no Brasil e, no

desenvolvimento de tecnologias e projetos específicos para o setor, destacam-se a *Dedini Indústria de Base S/A* e *Piracicaba Engenbaria*. As empresas *Novozymes*, *Lallemand*, *DuPont* e *BASF* estão entre as principais fornecedoras de tecnologias e insumos químicos e biológicos (NEVES *et al.*, 2021).

Em processo convencional, tem-se, como rendimento médio por tonelada de milho processado: 420 L de etanol, 243 kg de DDGS, 69 kg de WDG e 12,5 kg de óleo de milho (WYMAN; SPINDLER; GROHMANN, 1992; WANG *et al.*, 2012). Para tal rendimento, demanda-se em média 97 kWh de energia elétrica, além de insumos: 6,4 kg de produtos químicos (NEVES *et al.*, 2021) e 0,65 kg de enzimas (NOVOZYMES, 2019).

2.2.3. Matéria-prima

A rota bioquímica de produção de etanol a partir da conversão de açúcares em álcool etílico é a principal, em todo o mundo. Todo material que contenha carboidratos que possam ser submetidos ao processo de sacarificação pode ser considerado uma matéria-prima potencial para a produção de etanol a partir desta rota (FERRARI, 2021).

O etanol de primeira geração é produzido a partir de biomassa com satisfatório teor de carboidratos na forma de açúcares ou amido. As principais matérias-primas sacarinas utilizadas atualmente são a cana-de-açúcar, beterraba, sorgo sacarino. Entre as principais matérias-primas amiláceas, estão milho, mandioca, trigo, centeio, sorgo granífero (BNDES; CGEE, 2008).

Historicamente, o etanol brasileiro é produzido através da fermentação alcoólica de caldo extraído da cana-de-açúcar. Entretanto, esta não é a única opção de substrato para produção de etanol.

Na Europa, principalmente no norte da França, a beterraba sacarina é utilizada tanto para produzir açúcar quanto etanol. Embora a cana-de-açúcar e a beterraba sejam as matérias-primas com o maior rendimento de produção de etanol por unidade de área, a matéria-prima globalmente utilizada em maior escala para produção de etanol é o milho – especialmente nos Estados Unidos da América, maior produtor mundial de etanol (56 bilhões de litros em 2021, segundo RFA, 2022). A Tabela 3 apresenta informações que facilitam a comparação das características de algumas matérias-primas, mais amplamente utilizadas para produção de etanol.

Tabela 3. Características das principais matérias-primas utilizadas para produção de bioetanol.

Cenário	Milho	Cana	Beterraba
Período de cultivo (meses)	4	12 a 18	5 a 11
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	153	65	255
Fósforo (kg ha ⁻¹)	65	52	160
Potássio (kg ha ⁻¹)	77	100	65
Demanda hídrica (mm safra ⁻¹)	50 a 80	150 a 250	65 a 89
Demanda de energia (Mcal ha ⁻¹)	2,4 a 19	13,5 a 19	40 a 100
Custos de colheita (US\$ ha ⁻¹)	917	2.200 a 2.650	237 a 321
Produtividade ¹ (t ha ⁻¹)	6	75	61
Rendimento em etanol (L t ⁻¹)	360 a 440	70 a 90	105,0
Rendimento por área (m ³ ha ⁻¹)	3,8	6,4	6,4
Custo de produção ² (US\$ L ⁻¹)	0,50-0,87	0,24-0,42	0,46-0,77
Região de produção	EUA, Brasil, China, Canadá	Brasil, Tailândia, Argentina, Índia	Europa

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de SOUZA *et al.*, 2013; MANOCHIO *et al.*, 2017; MIZIK, 2021).

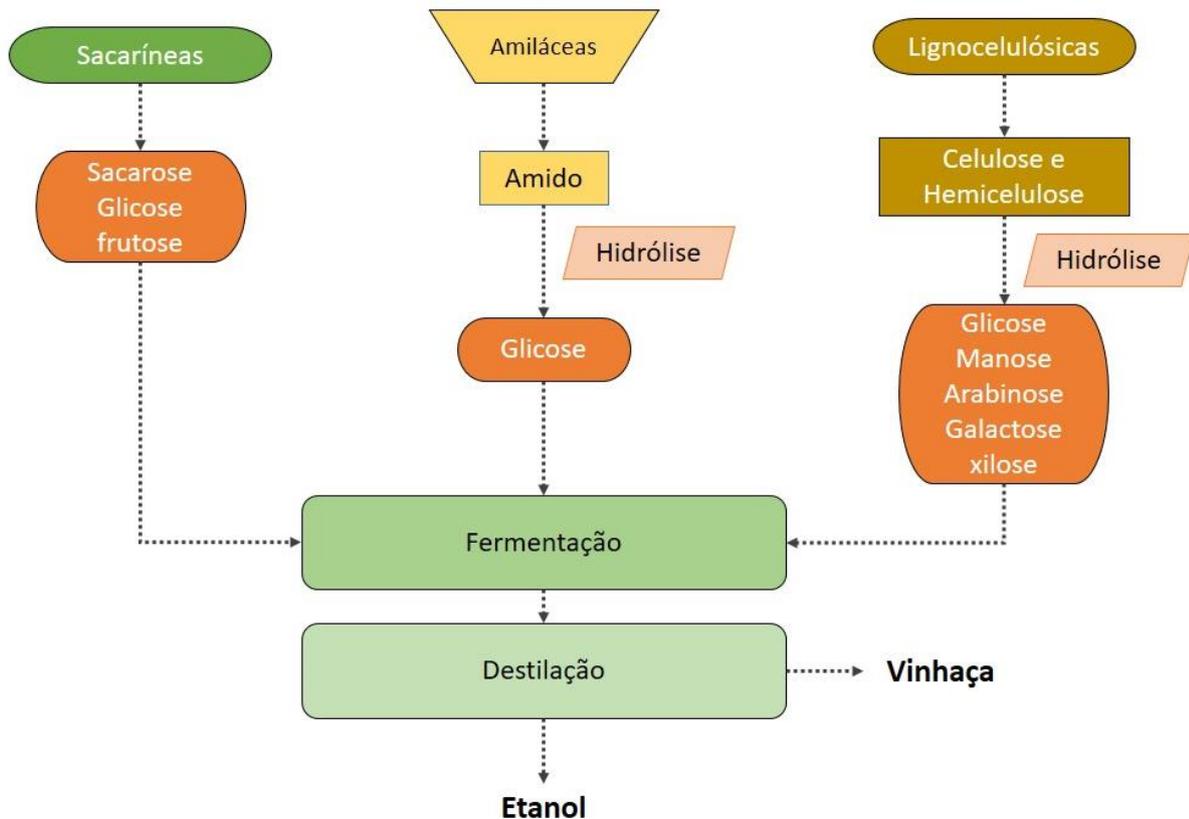
Nota: ¹Produtividade média de milho referente à segunda safra brasileira; ²Custo médio de produção de etanol de milho produzido nos Estados Unidos da América, etanol de cana produzido no Brasil e etanol de beterraba produzido na União Européia.

Por ser uma matéria-prima amilácea, cujo carboidrato de reserva é o amido, a utilização do milho como matéria-prima para produção de etanol só se torna possível por meio de processo hidrolítico: redução das cadeias de açúcares complexos (polissacarídeos) em açúcares de cadeia simples (monossacarídeos).

As matérias-primas disponibilizam carbono ao processo fermentativo. Elas podem ser classificadas de acordo com a estrutura e a complexidade molecular dos substratos, nas seguintes categorias: i. polissacarídeos solúveis: facilmente extraídos e prontamente fermentescíveis pela levedura (ex.: sacarose, glicose, frutose, lactose; presentes na cana-de-açúcar, beterraba, melão, soro de leite); ii. polissacarídeos insolúveis: precisam de tratamento moderado por meio de hidrólise química ou enzimática do material antes de ser disponibilizados à levedura (ex.: amido de milho, sorgo, batata, cevada, trigo, mandioca); iii. polissacarídeos insolúveis altamente resistentes:

necessitam de pré-tratamento físico anteriormente à hidrólise química ou enzimática a fim de produzir substratos na forma monomérica para então ser disponibilizado à levedura (ex.: celulose, hemicelulose) (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2008). A Figura 16 apresenta um fluxograma demonstrando as etapas de tratamento das matérias-primas anteriormente ao processo de fermentação.

Figura 16. Matérias-primas e respectivas etapas do processo necessárias para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de BAPTISTA, 2017).

Para ser adotada como matéria-prima a um processo, o material usualmente é avaliado quanto a parâmetros amplos de eficiência. Suas características devem atender a critérios econômicos, estratégicos, sociais, ambientais e, conforme mencionado, deve compor o plano de segurança energética do país e da região (BNDES; CGEE, 2008).

Também, é necessário identificar as oportunidades e alternativas que se destinam ao melhor uso da terra e ao melhor uso de recursos do sistema de produção, por meio da produção com tecnologia, melhores práticas de manejo, diversificação da agricultura, ganhos de eficiência, melhor gestão das áreas de produção e produtividades, para que não se crie qualquer cenário de

concorrência entre a produção de matérias-primas utilizadas como alimento e como biocombustíveis (IPCC, 2018).

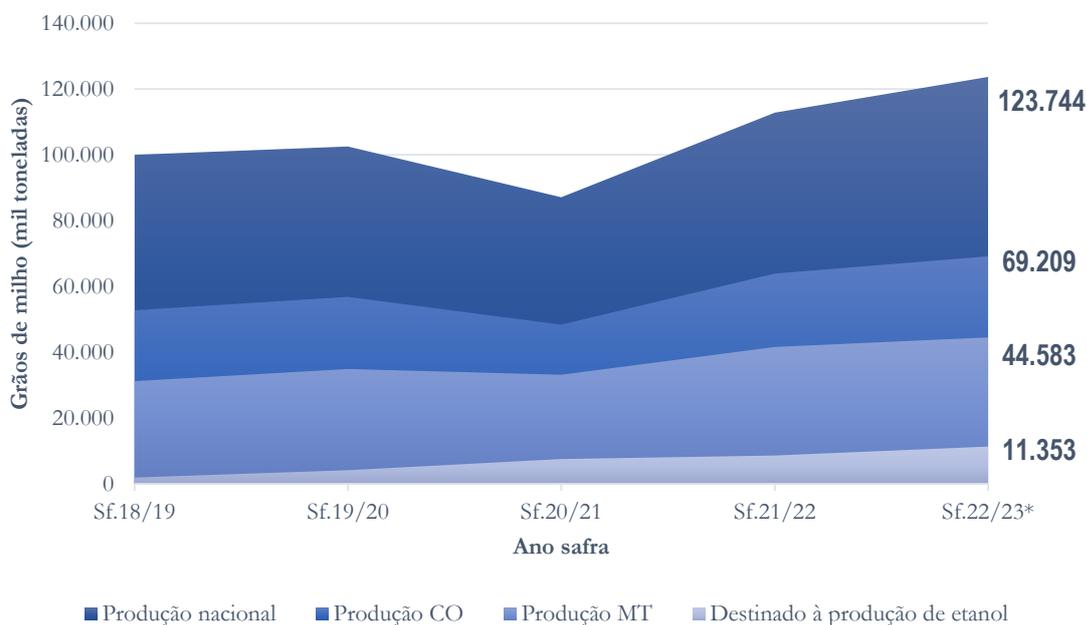
Produtividade agrícola satisfatória, viabilidade econômica de produção e adequada condição fitossanitária são características mínimas essenciais à matéria-prima elegível. Também é essencial que a biomassa e o processo para convertê-la em etanol apresente balanço energético positivo e tenha um balanço de carbono favorável. O balanço de carbono é determinado por meio de avaliações de ciclo de vida (ACV), as quais consideram toda a cadeia de produção até o uso dos biocombustíveis (COLLOTTA *et al.*, 2019).

No Brasil, não é recente a busca por matérias-primas alternativas para produção de etanol – porém com foco inicial de processamento na entressafra de cana-de-açúcar. Foi despertada justamente pela possibilidade de otimização do processo produtivo e redução dos custos industriais (MILANEZ *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2020). Contudo, na realidade dos cinturões de produção de cereais, o anfitrião passou a ser o próprio milho – o qual se tornou motivo para a mobilização de recursos destinados à implantação de projetos como matéria-prima única ou principal.

2.2.3.1. Milho de segunda safra

Mundialmente, a principal matéria-prima destinada à produção de etanol é o milho. Em 2021, os EUA destinaram pouco mais de 177 milhões de toneladas do grão para este fim (USDA, 2022a). No Brasil, cerca de 8,7 milhões de toneladas do cereal foram destinadas para produção de bioetanol na safra 2021/22 (CONAB, 2022) - de uma produção nacional total de 112 milhões de toneladas do cereal (Figura 17).

Figura 17. Produção de milho no Brasil, na região Centro-Oeste e no estado de Mato Grosso, e a demanda de grãos de milho para a produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

A produção nacional de milho na safra 2020/2021 esteve distribuída entre os estados de Mato Grosso (38,2%), Paraná (11,0%), Goiás (9,7%), Minas Gerais (8,1%) e Mato Grosso do Sul (7,4%). Estes estados produziram cerca de 64,7 milhões de toneladas, contribuindo com 74,3% da produção nacional (CONAB, 2022). Da produção nacional, mais de 60 milhões de toneladas correspondem ao milho de segunda safra, e pouco menos de 25 milhões de toneladas correspondem à produção do cereal em primeira safra (Tabela 4).

Para 2030/31, a produção brasileira total projetada é de 124 milhões de toneladas – projeção com limite superior em 149,9 milhões de toneladas. As exportações e a demanda de milho para a produção de etanol serão duas importantes forças a estimular a produção (CONAB, 2022).

Tabela 4. Produção de milho 1ª e 2ª safras por estado brasileiro.

Região/UF	Produção (mil t)			
	1ª safra	2ª safra	Total	%
Norte	846	2.579	3.517	3,9%
Roraima	0	0	90	0,0%
Rondônia	41	1.038	1.079	1,0%
Acre	79	13	93	0,2%
Amazonas	23	0	23	0,0%
Amapá	0	0	1	0,0%
Pará	512	603	1.115	1,5%
Tocantins	191	925	1.116	1,2%
Nordeste	5.040	2.212	8.789	11,6%
Maranhão	1.328	1.076	2.404	3,4%
Piauí	1.810	286	2.096	3,7%
Ceará	0	458	458	0,4%
Rio Grande do Norte	0	28	28	0,0%
Paraíba	0	50	50	0,0%
Pernambuco	0	63	141	0,1%
Alagoas	0	0	159	0,0%
Sergipe	0	0	729	0,0%
Bahia	1.901	252	2.724	4,0%
Centro-oeste	2.410	46.061	48.470	46,3%
Mato Grosso	438	32.806	33.244	30,6%
Mato Grosso do Sul	129	6.300	6.429	6,0%
Goiás	1.639	6.792	8.431	9,1%
Distrito Federal	204	163	366	0,5%
Sudeste	6.933	3.399	10.336	15,8%
Minas Gerais	5.056	1.969	7.025	11,1%
Espírito Santo	33	0	36	0,1%
Rio de Janeiro	3	0	5	0,0%
São Paulo	1.841	1.430	3.271	4,6%
Sul	9.495	6.490	15.985	22,3%
Paraná	3.124	6.490	9.614	11,2%
Santa Catarina	1.980	0	1.980	4,4%
Rio Grande do Sul	4.390	0	4.390	6,8%
Centro-sul	18.837	55.950	74.791,2	84,5%
Brasil	24.722	60.741	87.096,8	100,0%

Fonte: CONAB, 2021 (Safrá 2020/21).

Tabela 5. Evolução da produção brasileira de etanol de milho por estado produtor.

Unidade Federativa	Sf.18/19	Sf.19/20	Sf.20/21	Sf.21/22	Sf.22/23¹
Rondônia	0	4.673	7.200	0	0
Mato Grosso	590.994	1.269.485	2.390.378	2.982.000	3.335.367
Mato Grosso do Sul	0	0	0	0	714.480
Goiás	190.868	295.675	511.470	378.445	378.445
São Paulo	0	17.565	0	0	0
Paraná	9.569	88.165	112.773	112.773	112.772
Centro-Sul	791.431	1.670.890	3.014.621	3.473.218	4.541.064
BRASIL	791.431	1.675.563	3.021.821	3.473.218	4.541.064

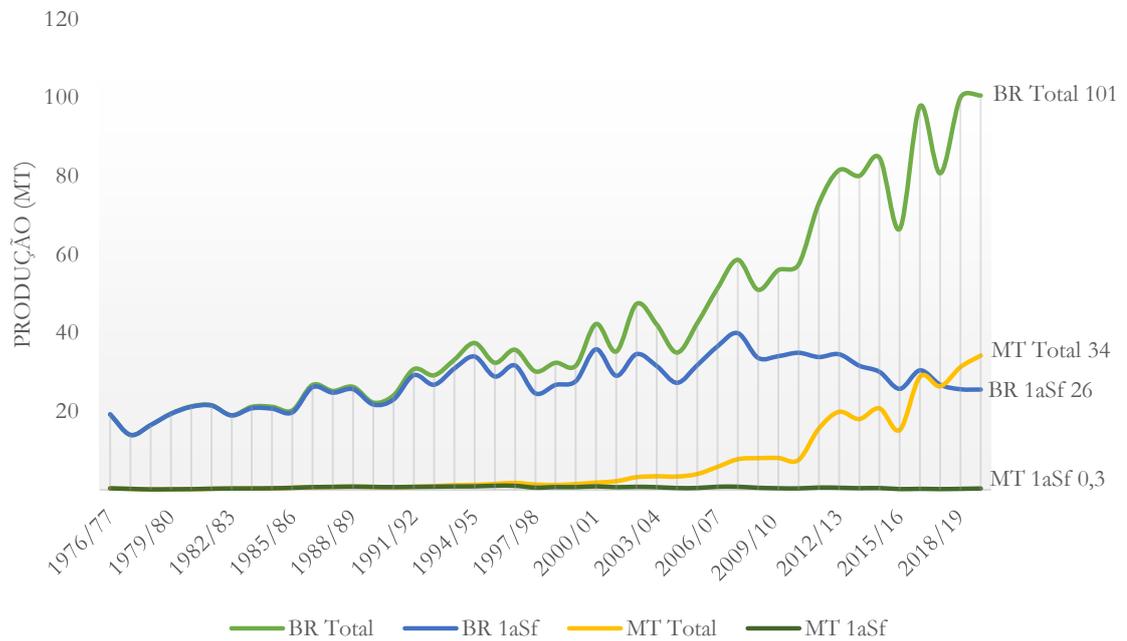
Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022. ¹Estimativa).

No presente, a quantidade de milho produzida na segunda safra supera a quantidade produzida em primeira safra no Brasil. O milho safrinha, cereal com tradição de produção nos cinturões agrícolas brasileiros (macrorregião Centro-Oeste), é usualmente cultivado em rotação com a cultura da soja (CONAB, 2021).

Usualmente, a soja é a cultura principal, sendo plantada no início da estação chuvosa – entre os meses de outubro e dezembro, e colhida entre os meses de janeiro e março. Após a colheita da soja, a área então é destinada ao plantio do milho safrinha (segunda safra) como cultura de inverno – a ser colhido entre junho e julho. Após a colheita do milho safrinha, costuma-se manter a área de produção em “*pousio*”, a qual muitas vezes é mantida com a palhada do milho sobre a superfície do solo: de forma a reter umidade no solo, evitar compactação por tráfego de equipamentos, proteger contra erosões e também disponibilizar matéria orgânica e nutrientes pela decomposição e incorporação de matéria vegetal (PEREIRA FILHO, 2015).

Merece destaque a evolução da área de milho cultivada nos últimos anos. Entre 2013 e 2020 a área total aumentou 17,1%. Além disso, deve-se notar que este aumento provém de uma redução em 36,3% da área do milho 1ª safra e aumento de 50% na área de milho 2ª Safra. Evolução importante de uma prática inicialmente secundária à agricultura mas que se consolidou como investimento e prática essencial ao sistema de produção agrícola, à produção de alimentos e, mais recentemente, à produção brasileira de energia renovável (CONAB, 2021). Na Figura 18 é possível observar o comportamento da produção de milho total e milho proveniente de primeira safra no Brasil e no estado de Mato Grosso, desde a safra 1976/1977.

Figura 18. Evolução da produção de milho no Brasil e especificamente no estado de Mato Grosso, entre as safras 1976/77 e 2019/20.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2020).

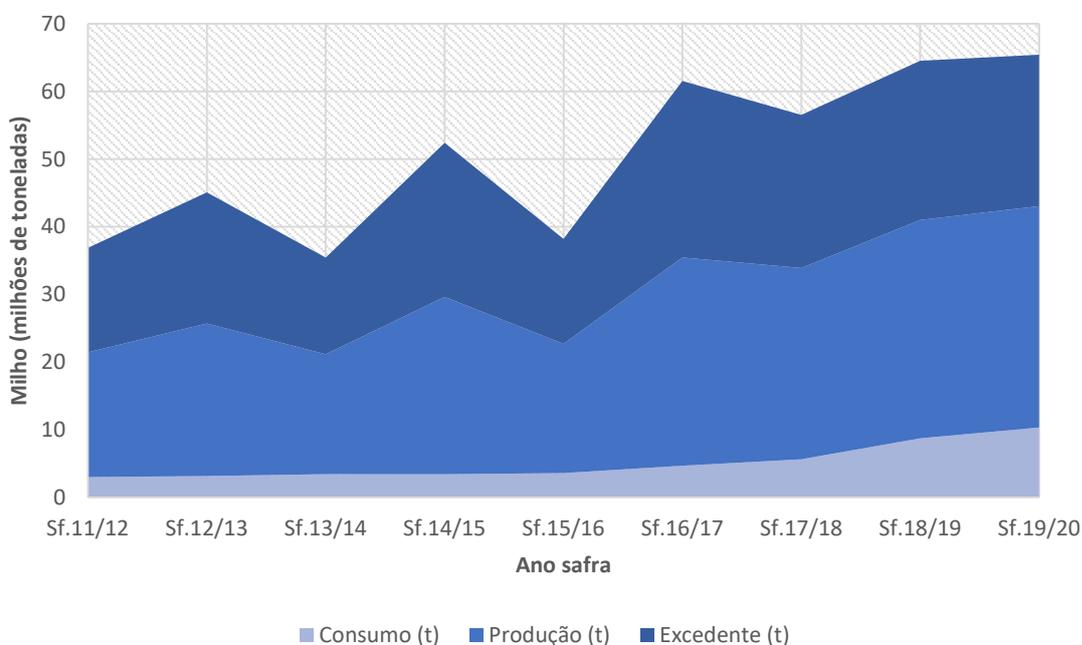
Tal crescimento compôs um cenário com excedentes de produção do cereal, aliado a desafios logísticos de escoamento - especialmente no estado de Mato Grosso (Tabela 6 e Figura 19).

Tabela 6. Produção, consumo e excedente de grão de milho no estado de Mato Grosso, entre as safras 2011/12 e 2019/20.

Período	Produção (t)	Consumo (t)	Excedente (t)
Safra 11/12	18.439.425	3.000.000	15.439.425
Safra 12/13	22.538.724	3.153.939	19.384.785
Safra 13/14	17.718.624	3.434.515	14.284.110
Safra 14/15	26.199.413	3.420.685	22.778.729
Safra 15/16	19.097.988	3.590.000	15.507.988
Safra 16/17	30.771.279	4.678.252	26.093.026
Safra 17/18	28.263.869	5.630.000	22.633.869
Safra 18/19	32.263.986	8.730.000	23.533.986
Safra 19/20	32.712.337	10.330.000	22.382.337

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de IMEA, 2021).

Figura 19. Evolução do consumo, produção e excedente de grãos de milho no estado de Mato Grosso.

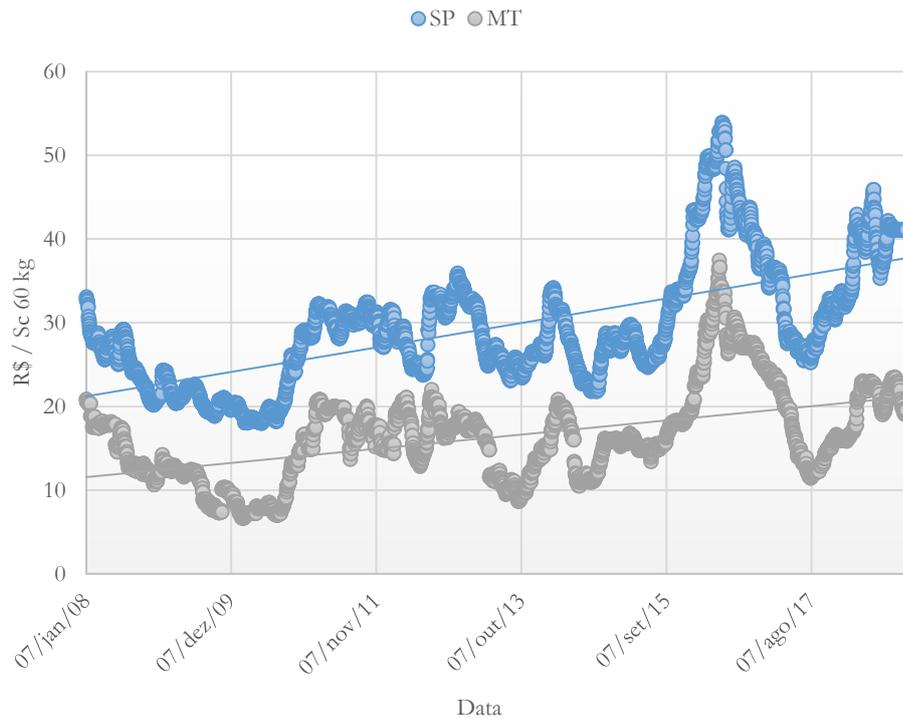


Fonte: Elaborado pelo autor (dados de IMEA, 2021).

Este cenário, por sua vez, resultou em preços acessíveis para aquisição da matéria-prima na região, correspondente a pouco mais de 50% dos valores praticados em outros estados

brasileiros (IMEA, 2021; CEPEA, 2022), conforme pode ser observado na Figura 20 e na Tabela 7.

Figura 20. Comparativo de preços da saca de milho nos estados de São Paulo e Mato Grosso, entre os anos de 2008 e 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CEPEA, 2022; IMEA, 2021).

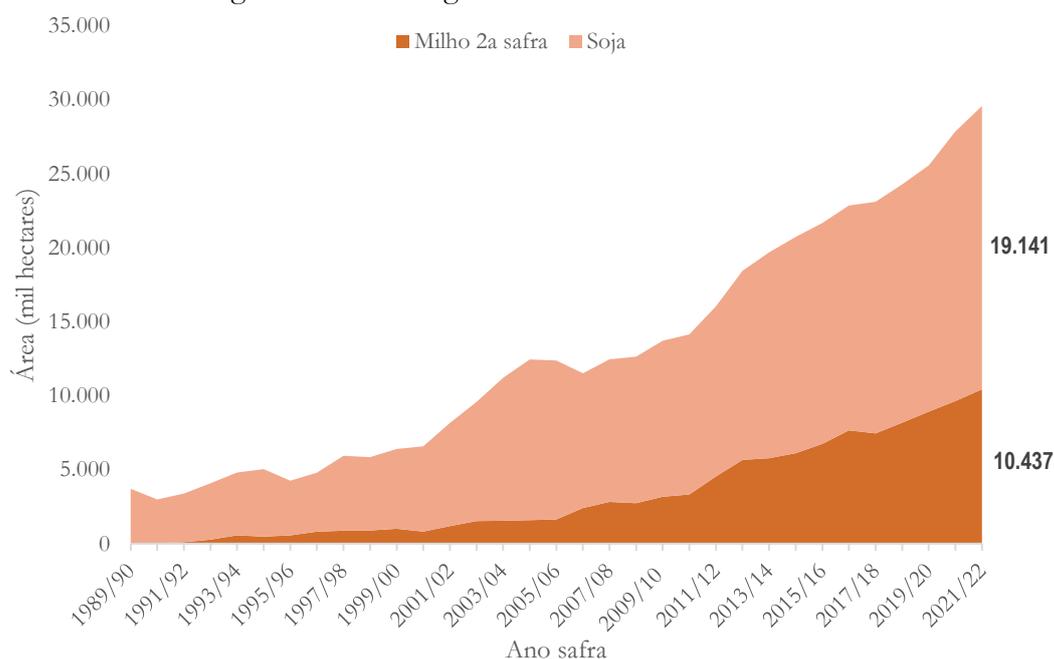
Tabela 7. Comparativo entre os preços médios da saca de milho praticados nos estados brasileiros de São Paulo e Mato Grosso.

Período	SP (R\$ sc ⁻¹)	MT (R\$ sc ⁻¹)	Var. (%)
2008-2018	29,47	16,35	55,5%
2013-2018	32,74	18,17	55,5%
2018	39,30	20,48	52,1%
2017	30,16	15,88	52,7%

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CEPEA, 2022; e IMEA, 2021).

Além do excedente de produção observado, há grande área de produção de soja ainda não utilizada para produção de milho safrinha. Na região Centro-Oeste, cerca de 45% do total de área utilizada para o plantio de soja durante o verão, ainda não é utilizada para o plantio de milho de inverno (segunda safra) – e esta diferença corresponde a significativos 8,7 milhões de hectares (Figura 21).

Figura 21. Área de cultivo de soja e área de cultivo de milho segunda safra na região Centro-oeste.



Fonte: Elaborado pelo autor (dados de CONAB, 2022).

Esta informação indica um potencial de aumento da produção regional de milho, o qual pode se intensificar caso se desenvolva um mercado consumidor local estável, em que os preços remunerem os custos de produção. O MAPA (2021), em sua projeção para a safra 2030/2031, afirma que não haverá necessidade de novas áreas de lavoura para expansão dessa atividade, uma vez que as áreas de soja liberam a maior parte das áreas requeridas para plantio de milho. As chamadas áreas de reforma de produção de cana-de-açúcar também podem ser utilizadas para produção de milho, além do amendoim e outras culturas.

Tabela 8. Potencial de produção de milho safrinha na macrorregião Centro-Oeste.

Unidade Federativa	Área	Área	Área	Produtividade	Aumento potencial ¹
	Soja	Milho safrinha	Soja sem milho safrinha	Milho safrinha	Milho safrinha
	(mil ha)	(mil ha)	(mil ha)	(t ha ⁻¹)	(t)
Mato Grosso	11.109	6.485	4.623	6,3	29.301.842
Mato Grosso do Sul	3.555	2.162	1.393	5,7	7.897.484
Goiás	4.394	1.740	2.654	4,5	12.065.919
Distrito Federal	84	50	34	4,6	158.004
TOTAL	19.141	10.437	8.704	5,3	49.423.249

Fonte: Elaborado pelo autor (dados da CONAB, 2022).

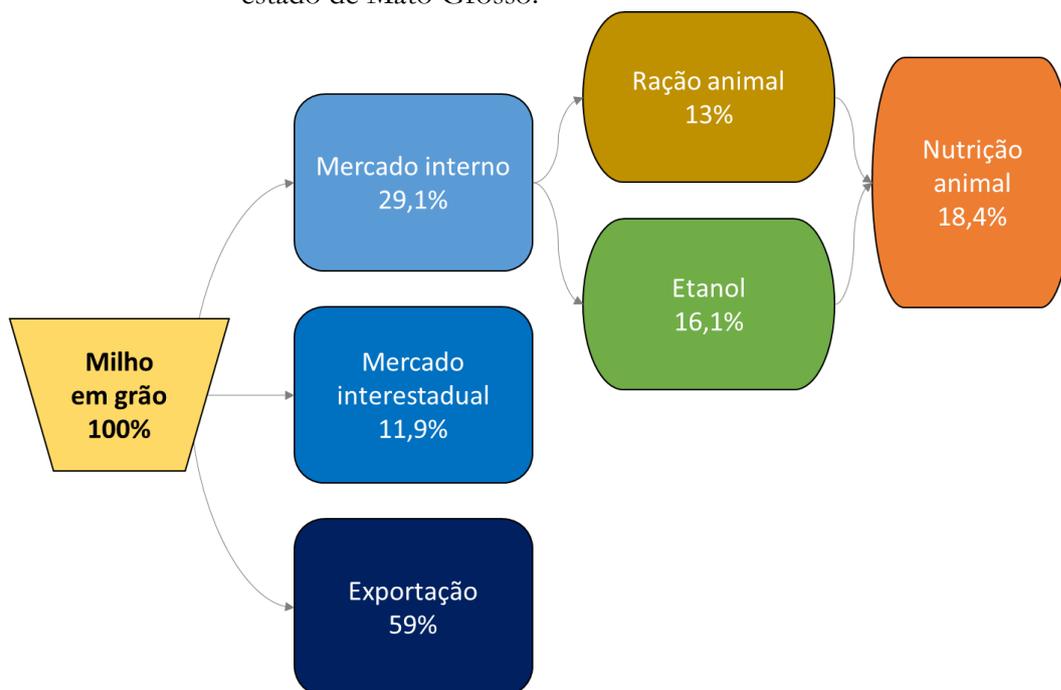
*Nota: Dados de produção referentes à safra 2021/22. ¹Potencial aumento da produção de milho safrinha em função de área de soja sem cultivo de milho segunda safra (t).

Ainda segundo o MAPA (2021), a área plantada de milho deve ter um acréscimo de 10,6% entre 2020/21 e 2030/31, passando de 19,8 milhões de hectares para 21,9 milhões de hectares. No limite superior, a área pode chegar a 27,7 milhões de hectares nos próximos dez anos. Conforme justificado, o milho de segunda safra deve ter forte expansão, passando de 14,9 milhões para 20,2 milhões de hectares.

O consumo interno de milho, que em 2020/21 representou 74,9% da produção, deve ter sua proporção reduzida - passando a 71,6% da produção em 2030/31. E as exportações devem passar de 29,5 milhões de toneladas em 2020/21 para 42,4 milhões de toneladas em 2030/31, podendo chegar a 61,0 milhões de toneladas (MAPA, 2021).

O aumento dos confinamentos de bovinos deve demandar maiores quantidades de milho para alimentação e, como complemento aos grãos de milho na composição de rações, além da soja citada pelo MAPA (2021), podemos considerar o próprio DDGS obtido como coproduto do processamento de milho para produção de etanol - e com características satisfatórias à nutrição animal, já que um terço do milho processado para a produção do etanol retorna à nutrição animal como DDGS (Figura 22).

Figura 22. Destinação dos grãos de milho produzidos no estado de Mato Grosso.

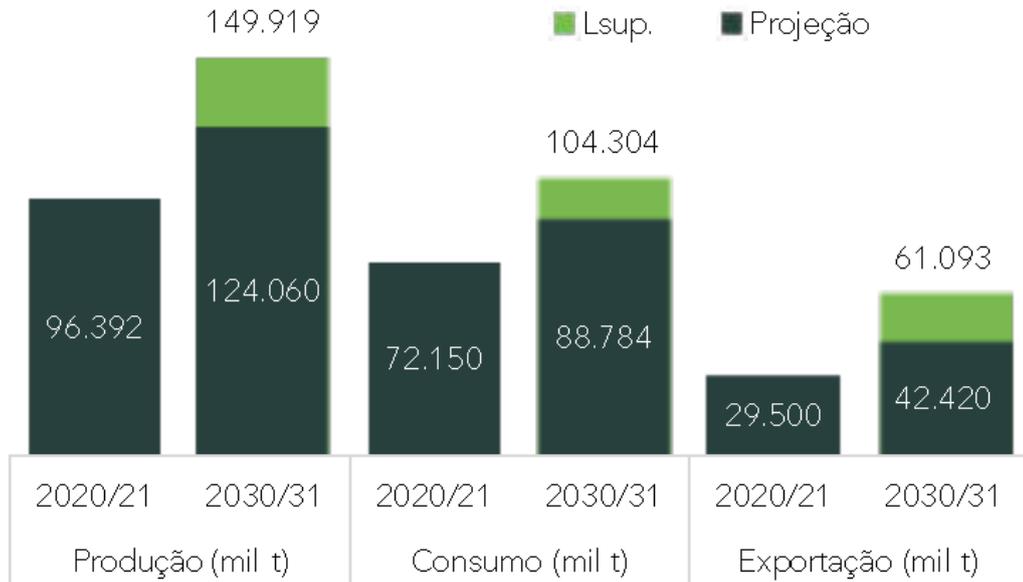


Fonte: Elaborado pelo autor (dados de IMEA, 2021 e RFA, 2021 - Safra 2019/20).

Para manter o consumo nacional projetado de 88,8 milhões de toneladas, além de garantir um volume razoável de estoques finais e o nível de exportação planejado, a produção projetada deverá situar-se entre 124,0 e 150,0 milhões de toneladas em 2030/31 (MAPA, 2021). Deve-se considerar que as projeções indicam produtividades crescentes nos próximos anos, especialmente do milho safrinha.

Também, deve-se notar que a produção de milho no país está sob pressão de aumento de consumo e de exportações, pois o milho adquire importância crescente como matéria-prima e como alimento (MAPA, 2021). Ainda segundo o MAPA, as projeções da OECD/FAO (2021) estimam a produção de 120,44 milhões de toneladas de milho em 2030/31 - valores inferiores ao estimado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. O MAPA (2021) ainda estima aumento de 28.7%, 23.1% e 43.8% na produção, consumo e exportação do milho no Brasil, respectivamente, até 2030/31 (Figura 23).

Figura 23. Projeção e estimativa de produção, consumo e exportação brasileira de milho.



Fonte: MAPA, 2021 (dados de CGAPI/DCI/SPA/MAPA; SIRE/Embrapa; Departamento de Estatística/UNB).

A produção de milho no estado de Mato Grosso cresceu sucessivamente desde os anos 2000. O observado crescimento de área da segunda safra e os ganhos de produtividade resultantes de pesquisas, desenvolvimento e inovações agrícolas, geraram um incremento a ponto de duplicar a produção de milho na safra 2011/12 (15,6 milhões de toneladas) em relação à safra imediatamente anterior (7,6 milhões de toneladas) (CONAB, 2022) no estado – sendo o milho safrinha correspondente a 96,3% desta produção. Nesta realidade, a produção de milho em MT passou a superar largamente o consumo regional, gerando dificuldades para escoamento e estocagem do produto.

A macrorregião Centro-Oeste destaca-se por historicamente ser um cinturão de produção, com tradição na produção de grãos e consumo moderado dos cereais. Os patamares de produção apresentam oscilações entre safras em função de níveis de preço definidos pelo mercado internacional (“*commodity*”). Em função dos elevados custos logísticos para escoamento da produção local excedente e do baixo valor agregado do milho (em comparação aos grãos de soja), a atratividade econômica da semeadura e cultivo do milho se dava apenas em temporadas de elevados preços internacionais do cereal (IMEA, 2021).

Por outro lado, do ponto de vista técnico-agronômico a produção do milho safrinha como rotação de cultura gera benefícios nas áreas de produção de soja. Pode trazer benefícios relacionados à conservação do solo, ciclagem de nutrientes e de carbono orgânico. Ainda, pode

favorecer os objetivos referentes à segurança alimentar. Tais fatores são incentivos para produção, o que reforça o cenário de excedentes na região (CONAB, 2022).

Figura 24. Grãos de milho sendo armazenados a céu aberto (condição inadequada) pelo fato dos produtores priorizarem o uso dos secadores de cereais para armazenamento de soja (estado de Mato Grosso, 2017).



Fonte: Acervo do autor (registros secundários, 2017).

Todo este cenário e contexto inseriu a produção de etanol de milho como alternativa para o suprimento da demanda crescente do biocombustível no país (especialmente na região) e como alternativa para direcionar o excedente e desvalorização do cereal na região. Ademais, a ociosidade das usinas na entressafra também é superada, por meio da estruturação de modelos de integração de matérias-primas (IGLESIAS; SESMERO, 2015).

Desta forma, portanto, o milho safrinha brasileiro direcionado à produção de etanol associa a bioenergia como alternativa para trazer benefícios à terra - em especial, a elevação do teor de carbono orgânico no solo (IPCC, 2018).

2.2.3.2. Milho como fonte de açúcares

Também pertencente à família Poaceae, o milho (*Zea mays*) tem o México como possível origem geográfica e atualmente é cultivado em mais de 150 milhões de hectares em todo o mundo (FAOSTAT, 2015).

É uma gramínea de ciclo anual (Figura 25), porém no Brasil pode ser cultivada em até três épocas distintas do ano em função de sua característica fisiológica e também devido à condição edafoclimática de algumas regiões do território brasileiro (CONAB, 2022).

O milho possui elevada taxa fotossintética em função de seu metabolismo C4, e todas as vantagens adaptativas que advém deste. Assim, a radiação solar é essencial para o desempenho da planta, especialmente em etapas de desenvolvimento e maturação dos grãos, condição metabólica que demanda produtos gerados pela atividade fotossintética (PEREIRA FILHO, 2015).

Figura 25. Registro fotográfico de planta de milho.



Fonte: Acervo do autor.

Para a semeadura do milho, as sementes são usualmente tratadas com defensivos, e o plantio ocorre em atividade integralmente mecanizada. A cultura exige adubações com macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) no plantio e aplicação de nitrogênio como adubação de cobertura, durante a condução da cultura (SIMÃO *et al.*, 2020).

No geral, o milho cultivado em segunda safra exige menores doses de fertilizante em comparação ao milho cultivado em primeira safra. O cultivo demanda aplicação de outros defensivos foliares e em cobertura, a fim de se controlar doenças, pragas e ervas daninhas. A colheita do grão é também integralmente mecanizada, por meio da separação imediata dos grãos e demais materiais vegetais (TABILE *et al.*, 2008).

Os grãos, após colhidos, seguem para a última etapa, de beneficiamento. Esta atividade fornece as condições necessárias para que o cereal seja estocado: pré-limpeza, a partir de peneiras classificatórias, e secagem dos grãos (umidade preferencialmente menor que 12%). Feito isto, o cereal pode ser armazenado até o processamento (CORADI *et al.*, 2020).

O grão de milho tem em sua composição química, entre 72 e 73% de carboidrato na forma de amido, como reserva energética (Tabela 9). Este amido, após hidrolisado, pode servir como fonte de açúcares para produção de etanol pelas leveduras (PAES, 2006).

Tabela 9. Composição química do grão de milho, em percentual médio.

Substrato	Percentual (% m m⁻¹)
Proteína	10,1%
Lipídeos	3,4%
Carboidratos	72,7%
Fibras	5,2%
Minerais	1,9%

Fonte: PAES, 2006.

2.2.4. Biomassa como fonte de energia ao processo

No processo convencional de obtenção de etanol a partir do milho pode ocorrer déficit energético (balanço energético negativo), em função do elevado custo energético de processamento do cereal aliado à ausência de biomassa residual da cultura – a qual poderia ser utilizada para combustão em caldeira e disponibilização de energia ao processo.

A demanda de energia do processo industrial de produção de etanol de milho foi contabilizada por Salla *et al.* (2010), os quais encontraram o valor de aproximadamente 3,88 GJ por tonelada de milho processado (Tabela 10).

Tabela 10. Demanda energética do processo industrial de produção de etanol de milho estratificada em etapas e seus respectivos percentuais de contribuição.

Etapa industrial	Demanda energética (MJ t⁻¹ milho)	Contribuição (%)
Moagem	244,8	6,2
Hidrólise	1.950,3	50,2
Fermentação	17,9	0,5
Destilação	1.668,5	43,0
Manutenção	0,7	0,1
Consumo industrial total	3.882,2	100,0

Fonte: SALLA *et al.*, 2010.

A produção de etanol a partir de cana, por sua vez, tem balanço energético positivo pelo fato de utilizar como fonte de energia ao processo, o bagaço proveniente do colmo da própria cana-de-açúcar após a extração do caldo (BNDES; CGEE, 2008; MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; WANG *et al.*, 2012).

Neste sentido, a disponibilização de alternativa energética ao sistema norte americano de produção de etanol de milho, apresenta-se como adequação essencial para tropicalização do processo. Diferente da abundância das fontes fósseis comumente utilizadas nos EUA (carvão mineral ou gás natural), fontes renováveis de energia presentes no Brasil se apresentam mais coerentes por reduzir significativamente a intensidade de carbono do processo (MOREIRA *et al.*, 2020).

A utilização de biomassa para combustão em caldeira se apresenta como alternativa para suprir esta demanda. A biomassa destinada ao aproveitamento energético é uma fonte primária de energia, não fóssil - matéria orgânica cuja energia é armazenada sob a forma de energia química (EPE, 2022), cujo potencial para aumentar o suprimento de energia é significativo (MME, 2021b).

Matsuoka *et al.* (2010) afirma que a queima de biomassa foi tida por muito tempo como uma fonte exclusiva para fornecer energia à humanidade, e que sua utilização só perdeu força justamente com o advento do petróleo e do carvão mineral.

Nesta mesma linha, Alexander (1985) fez observações relevantes referentes à dependência mundial no uso de combustíveis fósseis para compor a matriz energética, destacando o grande potencial do uso da biomassa vegetal cultivada para suprimento dessa lacuna. Este autor considera que a biomassa de plantas cultivadas é uma forma de fornecer energia pouco valorizada comercialmente mas capaz de suprir a demanda energética futura principalmente para as nações tropicais.

Atualmente, a conversão da biomassa em energia térmica e posteriormente em energia elétrica pode ser conduzida de forma mais eficiente - dada a utilização de controles digitalizados e materiais sofisticados que permitem operação em condições de pressão e temperatura maiores nas caldeiras. Estas já são empregadas em projetos industriais *greenfields* de implantação mais recente, ou em indústrias que realizaram devidamente o processo de transição energética por meio da atualização da tecnologia e capacidade de suas caldeiras – o que aumenta consideravelmente a contribuição destas plantas industriais à geração direta de energia (MME, 2021b).

Coelho *et al.* (2020) destacam que as primeiras tecnologias instaladas para geração de energia elétrica nas destilarias brasileiras visavam apenas à autossuficiência da usina: empregavam turbinas com tecnologia de baixa pressão (18-22 bar), produzindo pouco ou nenhum excedente de energia elétrica. Contudo, alterações na legislação incentivaram a disponibilização de tecnologia com pressão mais elevada e, hoje, os sistemas trabalham em pressão de até 80-100 bar - a fim de aumentar a quantidade de excedente energético para exportação de energia elétrica.

A integração do setor alcooleiro a um contexto de excedente energético direciona as destilarias a um conceito de termoelétrica não dedicada. Entre as opções de biomassa para suprir a demanda energética do presente processo em estudo, tem-se o bagaço de cana. O bagaço da cana energia, em especial, apresenta maior rendimento energético por unidade de área cultivada em função de seu elevado teor de fibra (MATSUOKA *et al.*, 2010) – cerca de 4 vezes maior que a produtividade de biomassa proporcionada pelo cultivo de eucalipto (BRESSIANI, 2021).

2.2.4.1. Cana como fonte de biomassa: cana energia

Embora introduzida neste trabalho como fonte de energia ao processo, a cana-de-açúcar tem sua importância nacional como principal matéria-prima para produção de biocombustível. Na

Safra 2020/2021, cerca de 90,8% do etanol brasileiro foi produzido a partir da cana-de-açúcar (CONAB, 2021).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido por Índia e China. Produziu e processou 654,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2020/2021, tendo como principais estados produtores: São Paulo (54% da produção nacional), Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas e Mato Grosso – o que torna a macrorregião Centro-Sul responsável por mais de 92% da produção nacional de cana-de-açúcar (Tabela 11), com produtividade média de 78 t ha⁻¹. A área nacional de produção de cana, distribuída por região e unidade federativa, é apresentada na Tabela 12 (CONAB, 2021).

Tabela 11. Produção de cana-de-açúcar no Brasil por região e unidade federativa.

Região/UF	Produção (mil t)
Norte	3.488,8
Amazonas	281,5
Pará	1.036,4
Tocantins	2.171,0
Nordeste	48.448,3
Maranhão	2.427,4
Piauí	1.177,3
Rio Grande do Norte	3.067,8
Paraíba	6.242,1
Pernambuco	11.827,4
Alagoas	17.003,0
Sergipe	2.243,6
Bahia	4.459,9
Centro-Oeste	139.804,7
Mato Grosso	16.773,2
Mato Grosso do Sul	48.991,7
Goiás	74.039,9
Sudeste	428.592,7
Minas Gerais	70.565,8
Espírito Santo	2.655,2
Rio de Janeiro	1.083,3
São Paulo	354.288,4
Sul	34.193,2
Paraná	34.163,5
Rio Grande do Sul	29,7
Norte/Nordeste	51.937,2
Centro-Sul	602.590,6
Brasil	654.527,8

Fonte: CONAB, 2021 (Safrá 2020/21).

Tabela 12. Área de produção de cana por região e unidade federativa.

Região/UF	Área (mil ha)
Norte	45,7
Amazonas	3,7
Pará	13,8
Tocantins	28,2
Nordeste	849,7
Maranhão	33,1
Piauí	20,1
Rio Grande do Norte	57,7
Paraíba	118,3
Pernambuco	233,0
Alagoas	298,5
Sergipe	38,7
Bahia	50,4
Centro-Oeste	1.823,3
Mato Grosso	214,6
Mato Grosso do Sul	637,2
Goiás	971,6
Sudeste	5.378,0
Minas Gerais	854,2
Espírito Santo	46,9
Rio de Janeiro	32,7
São Paulo	4.444,2
Sul	519,4
Paraná	518,8
Rio Grande do Sul	0,7
Norte/Nordeste	895,4
Centro-Sul	7.720,8
Brasil	8.616,1

Fonte: CONAB, 2021 (Safrá 2020/21).

A cana pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum* (LAM *et al.*, 2016). É uma gramínea originária do sudeste asiático, contudo é manejada no Brasil como cultura semi-perene -

assim classificada por ser uma cultura que possibilita a realização de colheitas ao longo de 5 anos (ao menos) após o plantio.

A cultura, em seu primeiro ano de produção, recebe tratamento direcionado para a formação da lavoura e por esta razão é chamada de “cana-planta”. Ao fim deste primeiro período de produção (safra), a cana é então colhida. Contudo, continua produzindo a partir de rebrotas – as chamadas “socas” de cana ou “cana-soca” – ao longo de mais quatro períodos (safra) de crescimento e maturação da biomassa (SCHAFFER, 2016). Com técnicas aplicadas, entretanto, produtores conseguem aumentar a longevidade do canavial e elevar este período de produção e colheita para 10 a 15 cortes.

A planta apresenta elevada taxa fotossintética e eficiente conversão energética em função de seu metabolismo C4 – o qual permite que as folhas capturem dióxido de carbono do ambiente e o armazene em moléculas de 4 carbonos, até ser disponibilizado para fotossíntese. Esta condição possibilita maior concentração de átomos de carbono disponíveis para serem metabolizados, proporcionando maior independência da planta quanto à necessidade e controle da abertura de estômatos (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2010).

Tal mecanismo reduz a perda de água pelas folhas e garante vantagens à planta quando em regiões de alta luminosidade, alta temperatura e baixa umidade. E justifica, assim como no caso do milho, a satisfatória adaptação e resposta da cultura em território brasileiro (BUCKERIDGE, 2022): altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química e com elevado potencial de produção de biomassa (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2010).

A reserva energética da planta é estocada na forma de açúcares no colmo. Além de açúcares, o colmo também estoca os demais sólidos solúveis e água. O colmo é composto pelas fibras da cana, as quais, após o processamento da cana e extração do caldo (sólidos solúveis e água), compõem o que é chamado de bagaço da cana. Dos diferentes tipos de biomassa, o bagaço de cana é o que responde pela maior potência energética instalada no Brasil (COELHO *et al.*, 2020).

Proveniente das moendas e com 50% da umidade, o bagaço pode então ser utilizado como combustível às caldeiras para fins de cogeração: produção combinada de vapor e eletricidade. Em situações que a caldeira apresenta eficiência satisfatória é possível a geração de eletricidade excedente, a qual pode ser exportada à rede. Contudo, mesmo no caso de sistemas industriais que são apenas autossuficientes, sem gerar excedentes para a rede, Coelho *et al.* (2020) destacam que a contribuição é significativa - pois corresponde a uma demanda evitada no Sistema Interligado.

Para tal finalidade, a cana energia se destaca fortemente como material de interesse (*Saccharum spontaneum*). Matsuoka *et al.* (2010) consideram que a cana energia tem uma grande porcentagem de fibra, assim como um sistema radicular vigoroso, com um número abundante de colmos por touceira e colmos de menor diâmetro que a cana-de-açúcar convencional. Este autor comparou clones de diferentes canas energia com a variedade de cana-de-açúcar RB72-454, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Características de clones de cana energia (cana planta) em comparação à variedade RB72-454.

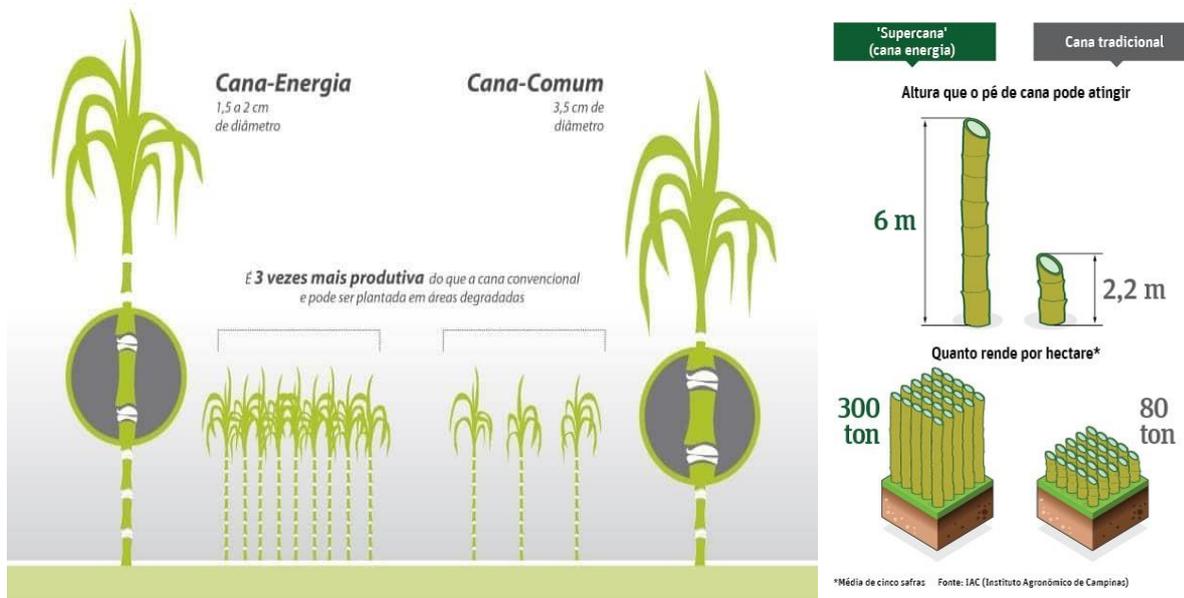
Clone	População (colmos m ⁻¹)	Fibra (%, m m ⁻¹)	Produtividade Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Produtividade Fibra (Mg ha ⁻¹)
1	40	19.9%	205	40.25
2	36	15.4%	236	36.74
3	36	19.6%	175	34.2
4	35	18.0%	173	30.98
5	39	19.8%	155	30.63
RB72-454	14	12.1%	148	17.08

Fonte: MATSUOKA *et al.*, 2010.

Os materiais genéticos de cana energia seriam, neste sentido, fornecedores de bagaço de grande potencial para as unidades processadoras - em comparação aos cultivares tradicionais de cana-de-açúcar ou cana sacarose. Isso devido à sua elevada capacidade de produção de biomassa e maior concentração relativa de fibra (MATSUOKA, 2014; OGATA, 2013).

A Figura 26, obtida a partir de GranBio (2018) e Lima (2016), apresenta as principais características e diferenças entre a cana energia e a cana sacarose.

Figura 26. Informações técnicas sobre a cana sacarose e a cana energia.



Fonte: LIMA (2016) e GRANBIO (2018).

Por possuir maior rusticidade, melhor potencial produtivo e menor exigência nutricional e hídrica, os materiais de cana energia atualmente obtidos tornaram-se uma das matérias-primas mais competitivas no campo da bioenergia (BARBOSA, 2014).

A cana sacarose pode disponibilizar entre 270 e 280 kg de bagaço em cada tonelada do material após a extração do caldo, constituído de 50% de fibras celulósicas e 50% de umidade (CAMPOS, 1990; NASCIMENTO, 2007). A cana energia, por sua vez, pode apresentar entre 420 e 460 kg de bagaço por tonelada de material nestas mesmas condições de composição e umidade (MELLO JR *et al.*, 1989; PERES, 1999; BRESSIANI, 2021). A composição físico-química do bagaço é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Composição físico-química do bagaço de cana.

Parâmetros	Teores médios (%)
Carbono	39,7 a 49
Oxigênio	40 a 46
Hidrogênio	5,5 a 7,4
Nitrogênio e cinzas	0 a 0,3
Umidade	50
Fibra	21
Brix	6
Impurezas minerais	2

Fonte: Adaptado pelo autor (dados de Mello Jr *et al.*, 1989; Peres, 1999; Silveira, 2019; Bressiani, 2021).

Segundo Lora *et al.* (2001), citados por Dantas (2010), e Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (2016), o teor energético do bagaço nestas condições é de aproximadamente 8,92 GJ por tonelada ou, em equivalentes energéticos, 2,48 MWh por tonelada (com base no poder calorífico inferior). Considerando 80 e 200 toneladas por hectare a produtividade da cana sacarose e da cana energia, respectivamente, tem-se cerca de 192 GJ de energia disponível no bagaço de 1 hectare de de cana sacarose e pouco mais de 749 GJ em bagaço obtido a partir de 1 hectare de cana energia. Em equivalentes energéticos, seriam disponibilizados cerca de 53,6 MWh e 208 MWh por hectare cultivado com cana sacarose e cana energia, respectivamente.

Em termos de disponibilização de energia portanto, como a própria denominação se coloca, a cana energia destaca-se em relação à cana sacarose pelo alto percentual de fibra em sua composição – condição sugerida por Alexander (1985) como característica de interesse (biomassa).

Como complemento, além do bagaço, ainda seria possível utilizar a palha da cana, recolhida durante ou após a colheita, e incorporada ao bagaço a fim de se ter um incremento na cogeração energética (BNDES; CGEE, 2008; SANTOS *et al.*, 2012).

A ponta e palha no momento da colheita têm cerca de 50% de umidade, que pode se reduzir a até 15% aproximadamente, após uma ou duas semanas de exposição no campo sem precipitação pluviométrica. A quantidade total de palha e ponta produzida por tonelada de cana sacarose é aproximadamente 155 kg, com 15% de umidade. Bressiani (2021) afirma que para cana energia tipo II a geração de palha está em torno de 250 kg de palha por tonelada de cana produzida.

Assumindo que o teor calorífico da ponta e palha com 50% de umidade é considerado igual ao do bagaço, com 15% de umidade o teor calorífico seria de 15,16 GJ por tonelada de palha e ponta – ou equivalente energético, 4,22 MWh com base no poder calorífico inferior (EPE, 2016).

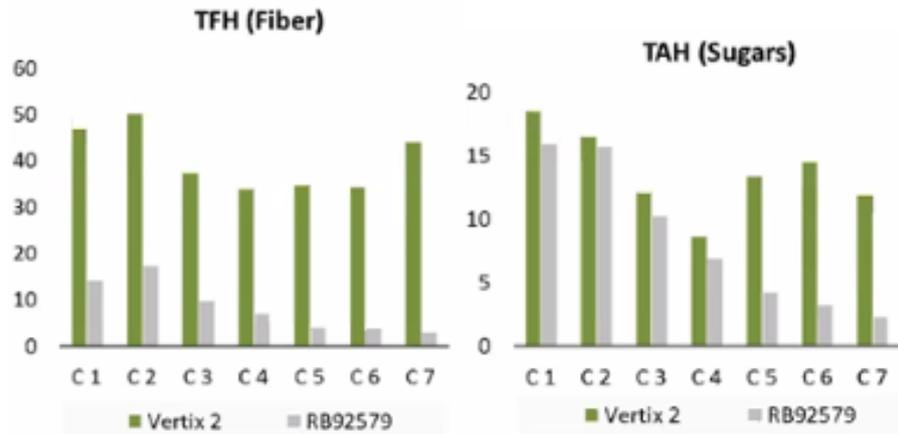
Assumindo recomendação de manutenção de 50% da palha de cana no campo a fim de se ter os benefícios agronômicos da cobertura do solo e decomposição da material vegetal (CARVALHO *et al.*, 2017), e recolhendo os outros 50%, tem-se pelo menos 120 kg de ponta e palha por tonelada de biomassa de cana energia produzida. Considerando a produtividade média de 200 toneladas de cana energia por hectare (BELTRAME, 2015), tem-se cerca de 24 toneladas de ponta e palha para disponibilização de energia ao processo, o equivalente a 101 MWh por hectare.

O excedente de energia elétrica pode ser direcionado à rede concessionária, o que pode proporcionar receita adicional à unidade de produção. Em especial, durante a entressafra – momento em que não há produção de etanol. Também proporciona ganhos ambientais e estratégicos ao país, por meio da diversificação da matriz energética e substituição de fontes energéticas menos sustentáveis ambientalmente. A cotação de preço para venda de energia elétrica por meio de leilões é da ordem de R\$ 293 para cada 1 MWh de energia disponibilizada à rede. No mercado spot, por sua vez, pode ser pago até R\$ 600 por MWh (CCEE, 2021).

Outra vantagem da cana energia em relação à cana sacarose está associada à longevidade do material, que sem técnicas especiais se mantém facilmente em boa performance de produção ao longo de 8 a 10 cortes (o que na cana sacarose é esperado em 5 cortes, em média). Além disso, pode ser cultivada em áreas degradadas (áreas de encostas, pastagens degradadas, ou de solos quimicamente pobres) e, quando comparada ao cultivo de eucalipto para geração de cavaco de madeira, a cana energia tem produtividade média de fibra (biomassa) cerca de 3 a 4 vezes superior (BRESSIANI, 2021) - além de disponibilizar o caldo açucarado.

Alguns resultados de produção de fibra e açúcar de cana sacarose (RB92-579) e de cana energia (Vertex 2) obtidos por Bressiani (2021) estão apresentados na Figura 27.

Figura 27. Resultados de produção de fibra e açúcar por hectare de cana sacarose variedade RB92-579 e cana energia cultivar Vertex 2 ao longo de 7 safras.



Fonte: BRESSIANI, 2021.

*Nota: TFH: toneladas de fibra por hectare; TAH: toneladas de açúcares reductores totais por hectare; Eixo X (C): número de cortes/safras.

2.3. Processo convencional de produção de etanol a partir de milho

2.3.1. Etanol de milho

De cada 100 partes de etanol produzido a partir de fontes amiláceas, cerca de 95% tem o milho como matéria-prima (BUŠIĆ *et al.*, 2018). E, mais ainda, o país responsável pelo maior volume de etanol produzido mundialmente tem o milho como matéria-prima principal: os EUA têm tradição sobre a produção de etanol do cereal e dominam toda a tecnologia e sistema de produção a partir desta fonte amilácea no cenário norte-americano, obtendo rendimentos industriais entre 372 e 420 L t⁻¹ de milho (UNEM, 2020).

Na realidade brasileira, segundo Faiad Neto (2014), o sistema de produção de etanol de milho pode ser conduzido na planta industrial de três formas: i. usina autônoma de etanol de milho (“*Full*”): unidade de produção destinada exclusivamente ao processamento de milho para produção de etanol; ii. usina integrada dedicada (“*Flex*”): unidade industrial de produção de etanol a partir do processamento de milho e de cana-de-açúcar (compartilhamento da estrutura/utilidades) em tempos diferentes (não simultâneo); iii. usina integrada compartilhada (“*Flex Full*”): unidade de produção de etanol a partir do processamento de milho e de cana-de-açúcar (compartilhamento da estrutura) em tempos simultâneos (compartilhamento do processo de fermentação e destilação), porém a moagem e preparo da matéria-prima para obtenção do mosto (hidrólise e clarificação) conduzidos em estruturas distintas. Não se considera, até o momento, a possibilidade de

processamento simultâneo do grão de milho junto ao caldo de cana-de-açúcar desde a etapa de hidrólise (FAIAD NETO, 2014). De forma a facilitar o entendimento, estas informações estão expostas no Quadro 1.

Quadro 1. Configurações de sistema existentes para a produção de etanol de milho, considerando a possibilidade de compartilhamento da estrutura utilizada no processamento de cana-de-açúcar.

Configuração da usina	Hidrólise	Fermentação	Destilação	Estrutura
Autônoma	Não	Não	Não	Não
Integrada dedicada	Não	Não	Não	Sim
Integrada compartilhada	Não	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (informações de FAIAD NETO, 2014).

Quadro 2. Períodos de integração e processamento das matérias-primas de acordo com as configurações de sistema de produção de etanol de milho já existentes.

Configuração da usina	Cana		Milho	
	Safra	Entressafra	Safra	Entressafra
Autônoma	Não	Não	Sim	Sim
Integrada dedicada	Sim	Não	Não	Sim
Integrada compartilhada	Sim	Não	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (informações de FAIAD NETO, 2014).

Segundo Faiad Neto (2014), a usina autônoma de milho (*“Full”*) produz etanol tendo apenas o milho como matéria-prima. Atualmente, no Brasil, é utilizado o cavaco de eucalipto para disponibilização de energia ao processo industrial e, por este motivo, direcionam investimentos ao desenvolvimento de parcerias para o plantio de eucalipto e instalação da estrutura necessária para a geração de energia elétrica a partir desta biomassa (cogeração).

A usina flex integrada dedicada de milho (*“Flex”*), produz etanol de milho em momento em que a cana-de-açúcar não está disponível para moagem (entressafra), i.e., são usinas de cana-de-açúcar contendo instalação de uma estrutura adjacente à planta principal para moagem do grão e

uso de equipamentos e demais instalações já existente em período em que não há processamento de cana - de forma não simultânea à produção de etanol de cana-de-açúcar (FAIAD NETO, 2014).

Já a usina flex integrada compartilhada de etanol de milho ("*Flex Full*"), produz etanol de cana e de milho paralelamente e simultaneamente ao período de moagem (safra) de cana-de-açúcar. Usualmente, recebem equipamentos necessários especificamente para o processamento de milho, de forma a possibilitar a moagem do grão, hidrólise e fermentação possíveis não apenas na entressafra - aproveitando a sinergia estabelecida por meio do processamento de cana para a produção de etanol de milho ao longo de todo o ano (FAIAD NETO, 2014).

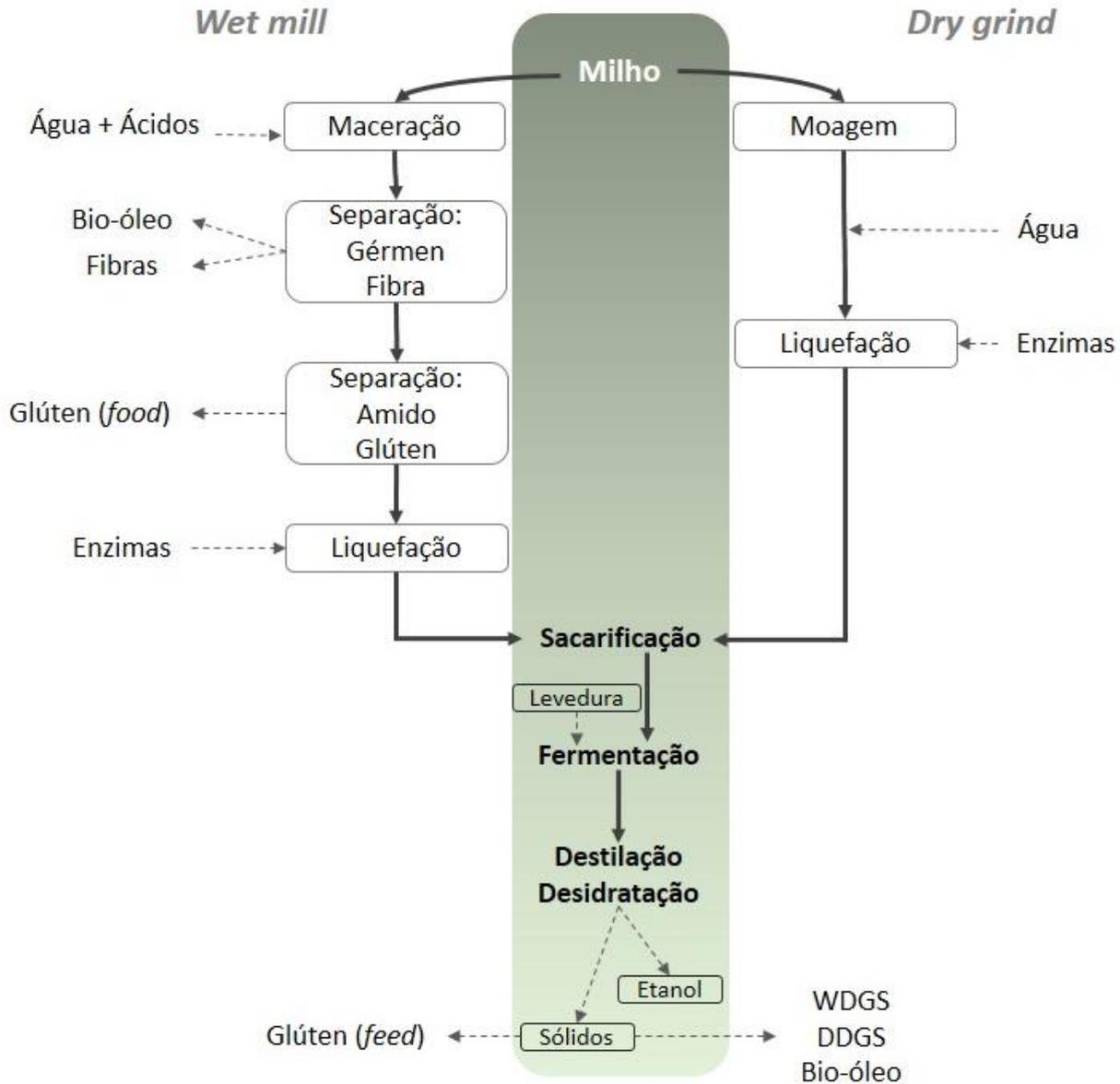
O etanol de milho foi introduzido no Brasil por meio de usinas "*Flex*" inicialmente, otimizando a infraestrutura, a energia e demais recursos já disponíveis em usinas de cana-de-açúcar. Devido aos excedentes de produção de milho existentes em regiões específicas de produção do cereal e, conseqüentemente, da prática de preços atrativos nestes mercados, investidores enxergaram oportunidades no Centro-Oeste brasileiro, conforme mencionado. Direcionaram seus recursos a pacotes tecnológicos estruturados em grandes "*greenfields*" modelo "*Full*" (produção de 250 a 500 milhões de litros de etanol por ano). Pelo fato de utilizarem o milho como matéria-prima, o qual pode ser estocado, estas unidades podem produzir etanol durante safra e entressafra.

2.3.2. Preparo do mosto

2.3.2.1. Rota de moagem dos grãos de milho

As tecnologias utilizadas para produção de etanol a partir de fontes amiláceas podem ser classificadas de acordo com a rota de moagem do cereal, sendo duas rotas principais: "*wet milling*" (moagem via úmida) e "*dry grind*" (moagem via seca). Na cadeia de produção norte americana, esta última representa aproximadamente 90% das plantas norte-americanas em operação, por ser uma estrutura mais enxuta, com menor custo de implantação e operação, e maior produtividade do produto etanol (RFA, 2021; WANG; WU; HUO, 2007). O esquema simplificado de produção de etanol de milho está representado na Figura 28.

Figura 28. Fluxograma simplificado de produção de etanol de milho.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de KRISHNAN *et al.*, 2000; MANOCHIO *et al.*, 2017; KELSALL; LYONS, 2003; NOVOZYMES, 2019; ICM, 2021).

Moagem a úmido (“Wet Milling”)

A rota úmida considera a separação do grão em suas partes componentes (gérmen, fibra, proteína e amido) na etapa de extração do amido. Para tal, aos grãos de milho é adicionada uma solução de água e ácido sulfúrico diluído a fim de facilitar a segregação dos componentes do grão. Os compostos obtidos são então separados por centrífuga, peneira e separador hidrociclone em: gérmen, glúten, fibra e amido (WANG; WU; HUO, 2007).

O gérmen pode ser destinado ao processamento, para composição do bio-óleo. O licor rico em amido é destinado à sacarificação e fermentação alcoólica para produção de etanol. E os demais componentes são desidratados para serem comercializados como ração, ou são posteriormente processados para destinação como produtos a base de glúten e com finalidades específicas - alimentícias ou industriais (WANG; WU; HUO, 2007; MANOCHIO *et al.*, 2017).

Embora tenha sido predominante nos EUA no início dos anos 1990, esta rota demanda infraestrutura mais robusta (considerada biorrefinaria) e se mostra versátil quanto à maior geração de coprodutos - muitas vezes com alto valor agregado. Porém por demandar maior custo de investimento e operação, esta representa cerca de 10% apenas das plantas produtoras de etanol de milho dos EUA. Passou a ser empregada apenas em projetos específicos que necessitem as possibilidades oferecidas por esta rota tecnológica, menos frequentemente (WANG; WU; HUO, 2007; MUELLER, 2010).

Moagem a seco (“*Dry Grind*”):

Na via seca de moagem, os grãos secos são direcionados diretamente à moagem e integralmente triturados a seco até granulometria inferior a 2 milímetros, de forma a serem transformados em particulado de milho. O amido presente neste particulado é então hidrolisado e posteriormente fermentado, em processo cujo produto principal é o etanol – embora também gere outros coprodutos (LUMPKINS; BATAL; DALE, 2004; ICM, 2021).

Por ser um processo mais simples e não exigir uma estrutura tão complexa como àquela necessária para condução da rota úmida (“*Wet Milling*”), a moagem a seco apresenta menor CAPEX e, além disso, ainda pode alcançar um rendimento em etanol cerca de 15% superior à rota úmida (MIZIK, 2021).

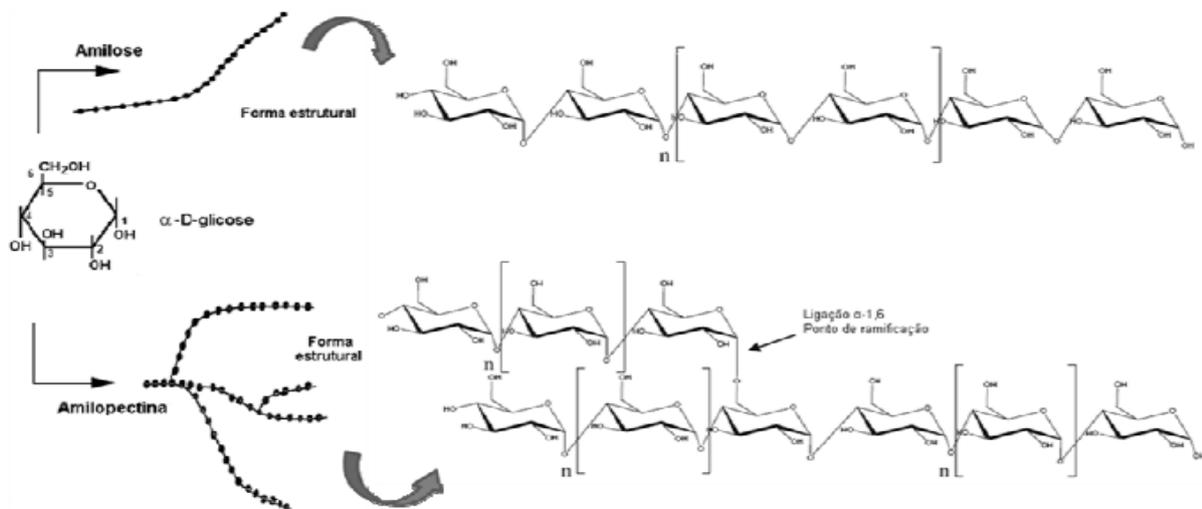
2.3.2.2. Hidrólise

O amido é o carboidrato de reserva do milho, presente em aproximadamente 72,7% da composição do grão de milho (PAES, 2006). O amido é uma mistura de poliglucanos lineares e ramificados, denominados amilose e amilopectina – além de alguns componentes secundários (Figura 29).

A amilose é formada por unidades lineares de glicose unidas por ligações glicosídicas α -1,4. Tipicamente, corresponde a 15-30% da massa total do amido (CORRADINI *et al.*, 2005).

Já a amilopectina, corresponde a cerca de 76% da massa total do amido. É formada por uma cadeia ramificada de unidades de glicose que, adicionado às unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -1,4, tem-se as ligações ramificadas unidas por ligação glicosídica α -1,6 – cerca de 4 a 5% das ligações (MANNERS; MATHESON, 1981; MURTHY *et al.*, 2011).

Figura 29. Representação da forma estrutural dos componentes do amido: amilose e amilopectina.

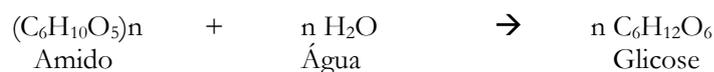


Fonte: MURPHY, 2000 e CASTRO *et al.*, 2011 *apud* CINELLI, 2012.

Conforme já relatado, o amido não é prontamente metabolizado pelas células de levedura e, por consequência, para produção de etanol torna-se necessário a hidrólise ou sacarificação do amido (Figura 30) a fim de torná-lo açúcar fermentescível às leveduras (INGLEDEW *et al.*, 2009a).

Este processo de hidrólise, portanto, consiste na quebra do amido (polissacarídeo) em seus açúcares constituintes - açúcar de cadeia simples denominado glicose (monossacarídeo) (INGLEDEW *et al.*, 2009a; MURTHY *et al.*, 2011).

Figura 30. Representação estequiométrica da hidrólise do amido.



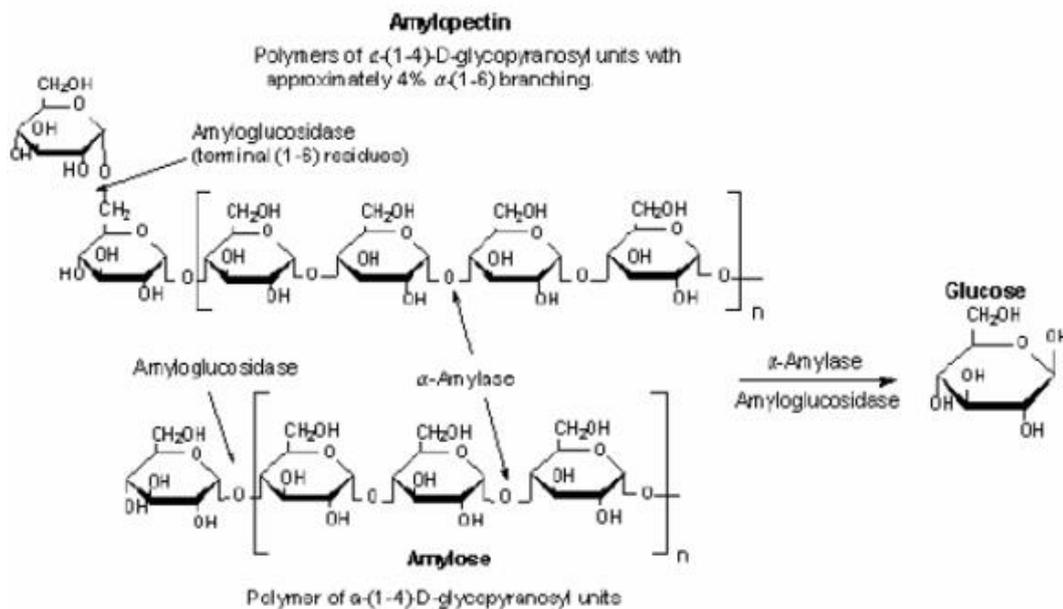
Fonte: WYMAN e HINMAN, 1990.

Enzimas

Entre as enzimas existentes para a depolimerização do amido, duas são comumente utilizadas no processo de hidrólise do amido de milho para produção de etanol (Figura 31). A endoenzima α -amilase catalisa o rompimento das ligações glicosídicas α -1,4 no interior do polímero, a partir de seu ataque randômico a moléculas com pelo menos três unidades de glicose - gerando maltoses (DP2), dextrinas e oligossacarídeos (MURTHY *et al.*, 2011).

Na sequência, a glucoamilase age catalisando a hidrólise tanto exclusivamente sobre ligações α -1,4, quanto sobre ligações α -1,4 e α -1,6. Esta possui ação lenta no ataque inicial à amilose, pois sendo uma exoenzima, atua exclusivamente a partir da extremidade não-redutora e portanto não penetra no interior da estrutura helicoidal da amilose (FUJII *et al.*, 1988).

Figura 31. Representação ilustrativa da forma de ação das enzimas α -amilase e amiloglicosidase sobre a estrutura do amido.

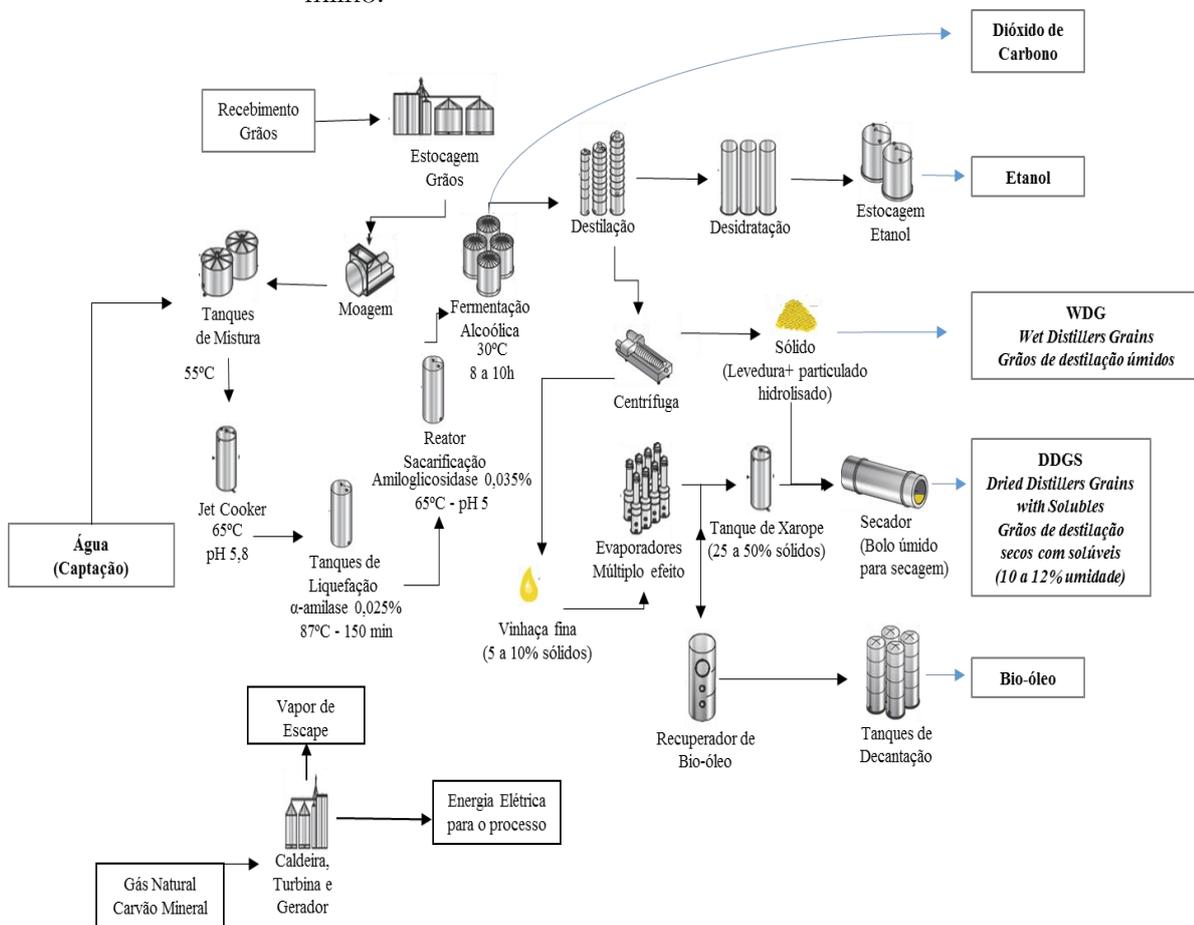


Fonte: BAPTISTA, 2017.

Rota de hidrólise e fermentação

As etapas de hidrólise e fermentação podem ser realizadas separadamente, seguindo rota SHF (“*Separate Hydrolysis and Fermentation*”). A Figura 32 representa a visão global do processo convencional de produção de etanol de milho utilizando esta rota, a qual apresenta vantagens principalmente quanto à possibilidade de operar com temperaturas distintas e mais próximas dos parâmetros ideais para cada enzima e etapa de processo (KRISHNAN *et al.*, 2000).

Figura 32. Fluxograma do processo convencional SHF (“*Separate Hydrolysis and Fermentation*”) de produção de etanol de milho.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de KRISHNAN *et al.*, 2000; KELSALL; LYONS, 2003; NOVOZYMES, 2019; ICM, 2021).

2.3.3. Fermentação alcoólica

Atualmente, a via de obtenção de etanol através da fermentação por leveduras é a mais utilizada, embora haja outros meios. As leveduras são microrganismos anaeróbios facultativos, ou seja, são capazes de crescer na presença ou na ausência de oxigênio. Quando o oxigênio é suficiente e a concentração de carboidratos no substrato é baixa, pouco ou nenhum etanol é produzido e a levedura segue a fosforilação oxidativa (respiração aeróbia), com o oxigênio como acceptor final de elétrons e os açúcares são utilizados para produção de energia e crescimento celular. Entretanto, quando há ausência de oxigênio (anaerobiose) ou alta concentração de glicose no substrato, o etanol é o principal produto final.

A partir da estequiometria formulada por Gay-Lussac (em 1815), pode ser obtido até 51,1% de etanol e 48,9% de CO₂ em base mássica, em relação a glicose metabolizada, e ainda são produzidos na glicólise dois moles de ATP (adenosina trifosfato) por mol de glicose, usados para a manutenção energética das células.

Na fermentação alcoólica, enzimas presentes na levedura fazem a bioconversão anaeróbica de açúcares fermentescíveis em etanol. Trata-se, portanto, de um processo bioquímico de formação de etanol. Além de produtos secundários, tais como dióxido de carbono, ácidos, entre outros (WYMAN; HINMAN, 1990; INGLEDEW *et al.*, 2009c).



2.3.3.1. Propagação do fermento

No processo convencional de produção de etanol de milho, as células de levedura utilizadas na fermentação não são recuperadas após a fermentação (reciclo do fermento). Por este motivo (i), também por ser oneroso adquirir toda a levedura necessária ao processo (ii) e pelo ganho em produtividade de fermentação que se tem ao inocular apenas células de levedura em fase exponencial de atividade metabólica (iii), torna-se essencial a propagação do fermento em reator dedicado - anteriormente ao processo fermentativo. A multiplicação de células toma por volta de 9 horas, sob aeração, de forma a favorecer o metabolismo respiratório (fosforilação oxidativa) e maximizar a reprodução das células de levedura – minimizando a produção de etanol nesta etapa. Nesta, também é recomendada temperatura entre 34 e 36°C, suplementação nutricional e alimentação gradativa do mosto (MENDES *et al.*, 2013; NOVOZYMES, 2019).

2.3.3.2. Batelada alimentada

A fermentação do mosto obtido a partir de grãos de milho pode ser conduzida em batelada alimentada. Neste cenário o mosto é alimentado gradativamente no reator, juntamente com a levedura também adicionada (INGLEDEW *et al.*, 2009d).

A pressão osmótica na fermentação é exatamente a pressão exercida pelo mosto sobre a levedura, devido à tendência de estabelecer o equilíbrio entre a concentração de solutos, dentro e fora das células. Quanto maior a concentração de sólidos no mosto, maior será a pressão osmótica (JOHN *et al.*, 2012).

No entanto, de acordo com Basso *et al.* (2011), quando conduzida em sistema de batelada alimentada, a pressão osmótica tende a deixar de ser um dos fatores de estresse mais relevantes no processo fermentativo industrial. Isto porque durante o processo de alimentação, em torno de 4 a 6 horas, a concentração total de açúcares não excede a faixa entre 50 e 70 g L⁻¹.

2.4. Processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar

Considerando:

- i. a importância e tradição da cana-de-açúcar para a produção brasileira de etanol;
- ii. que parcela significativa da produção de etanol de milho brasileira está associada a indústrias produtoras de etanol de cana-de-açúcar; e,
- iii. que a cana está sendo contextualizada no presente trabalho como fonte de energia ao processo;

Torna-se indispensável tratar sobre o sistema convencional brasileiro de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, como referência nesta revisão de literatura do presente estudo.

2.4.1. Etanol de cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de etanol a partir de cana-de-açúcar. O rendimento industrial médio na produção brasileira de etanol a partir de cana foi de 85,13 litros de etanol por tonelada da matéria-prima na safra 2020/21 (CONAB, 2022; UNICA, 2021).

O processamento da cana-de-açúcar para produção de etanol ocorre em usinas de produção de etanol ou destilarias. Inicia-se com a quantificação da matéria-prima encaminhada para a indústria, por meio da pesagem do caminhão. Posteriormente, faz-se a coleta de amostra por meio de uma sonda oblíqua, a qual perfura a carga de forma diagonal a fim de extrair a amostra que representará a carga na etapa de caracterização da qualidade tecnológica da matéria-prima – por meio dos indicadores: impureza vegetal, impureza mineral, Pol (teor de sacarose), Brix (teor de sólidos solúveis), fibra, ART (açúcares redutores totais) e, a partir destes, calcula-se o ATR (açúcar total recuperável). Tais resultados são utilizados como indicadores para a remuneração dos fornecedores de cana-de-açúcar e também como indicadores para condução e gestão do processo agroindustrial (CONSECANA, 2015).

Após a pesagem e coleta da amostra, direciona-se a cana-de-açúcar para o hilo a fim de descarregar a matéria-prima na mesa de recepção e limpeza, onde pode ou não ser lavada – a depender da forma como o material foi colhido.

Usualmente a cana é colhida de forma mecanizada (com auxílio de colhedoras, transbordos e caminhões), de forma que a matéria-prima é mecanicamente picada pela colhedora (facões picadores) no momento do corte. Uma vez picada, a cana se torna exposta a perdas de açúcares: tanto por decomposição microbiológica; quanto por retirada do açúcar exposto nos

pontos de corte. Por este motivo, a etapa de limpeza da cana picada é mais frequentemente realizada a seco – de forma a remover tanto quanto possível as impurezas minerais e vegetais carregadas com a matéria-prima com mínima perda de açúcares. Após a recepção e limpeza (mesa de recepção), o material é então direcionado à esteira - onde será transportado aos sistemas de preparo da matéria-prima e extração (SILVA JUNIOR; CARVALHO, 2010).

2.4.2. Preparo do mosto

2.4.2.1. Preparo da cana e extração do caldo

A cana colhida e disponibilizada na mesa de recepção da indústria, é então direcionada ao sistema de preparo: picador e desfibrador. O picador tem a função de fragmentar a cana em pedaços menores. O desfibrador, é um conjunto de martelos cuja função é expor fibras e romper células do colmo de forma que, na sequência, a extração do caldo seja realizada com maior eficiência de extração (PALACIO, 2010).

A cana preparada segue então para os difusores ou moendas. A extração por meio de moendas é o sistema mais usual e é composto por um tandem de moenda (conjunto de moendas) que, por sua vez, é composto por ternos de moenda (unidade de moenda composta por cilindros de esmagamento). Uma técnica utilizada para favorecer a extração dos açúcares presentes nas fibras submetidas à pressão das moendas é a adição de água aquecida junto às fibras - prática denominada embebição. Também são dosados biocidas a fim controlar o nível populacional de microrganismos contaminantes presentes no caldo, os quais degradam açúcares e produzem metabólitos prejudiciais ao processo.

Em sistemas de extração compostos por difusores (em substituição à moenda) não há o esmagamento da fibra. O caldo é então extraído por difusão, na qual soluções em concentrações diferentes de determinado soluto - e separadas por uma membrana permeável - buscam naturalmente adquirir o equilíbrio entre as concentrações. Ou seja, ao longo do percurso de difusão (no difusor) faz-se a recirculação de caldo misto e/ou água com menores concentrações de açúcares pelas fibras - com maiores concentrações de açúcares. De forma que, ao buscar o equilíbrio entre as concentrações, o açúcar em maior concentração na fibra da cana é extraído para a solução. Após o difusor, a massa fibrosa é ainda direcionada para um terno de moenda a fim de se extrair qualquer residual de solução açucarada ainda presente no bagaço – e, por consequência, reduzir a umidade deste. Ao fim da etapa de extração tem-se o bagaço (a aproximadamente 50% de umidade) e o caldo (BNDES; CGEE, 2008).

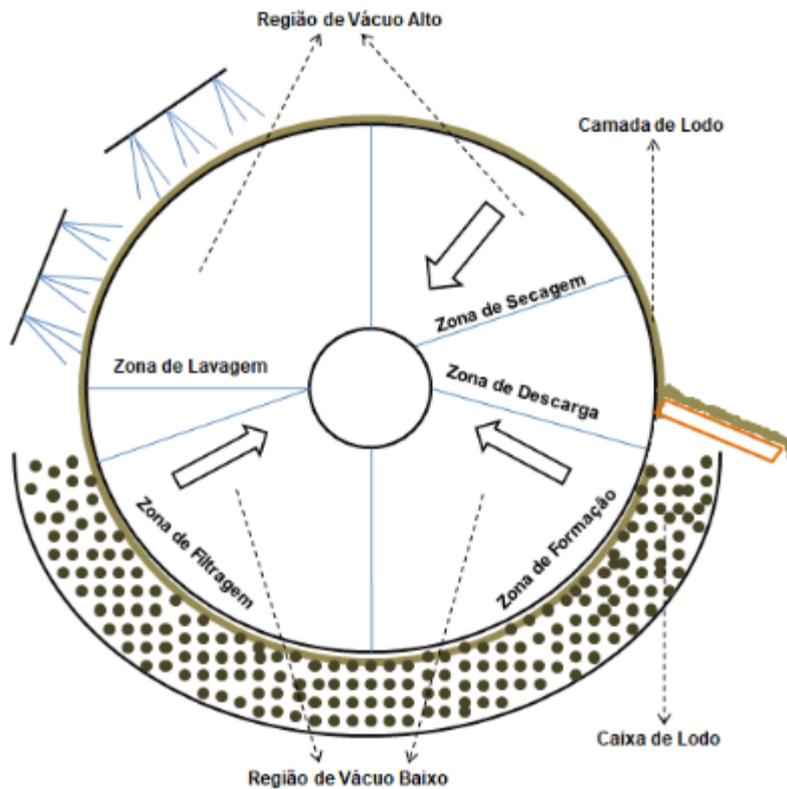
O bagaço obtido é então direcionado para caldeira, onde é utilizado para combustão e geração de energias térmica (e elétrica) ao processo – o que torna o processo autossuficiente em energia. O caldo, por sua vez, segue para a etapa de clarificação (BNDES; CGEE, 2008).

2.4.2.2. Clarificação do caldo

A clarificação do caldo é realizada de forma a minimizar a presença de impurezas neste material que irá compor o mosto, por meio físico e químico. A clarificação é composta pelas operações de peneiramento, caleação, aquecimento e decantação. Recebe dosagens de polímeros, floculantes, bases para ajuste de pH, de modo a aumentar a sedimentação de impurezas no tanque decantador – compondo um lodo em sua base (DELGADO *et al.*, 2019).

Este lodo é então direcionado ao filtro rotativo (Figura 33) que, sob vácuo e com mínima adição de água, tem a função de recuperar açúcares presentes neste material – os quais retornam ao tanque de caleagem para novo ciclo de clarificação. Após passar pelo filtro rotativo, este lodo passa a compor então uma torta úmida: a chamada torta de filtro. Esta se apresenta como um terceiro subproduto (além do bagaço e energia elétrica) do processo, a qual usualmente é transportada para a própria lavoura de cana-de-açúcar de forma a disponibilizar ao solo nutrientes e matéria-orgânica (BNDES; CGEE, 2008).

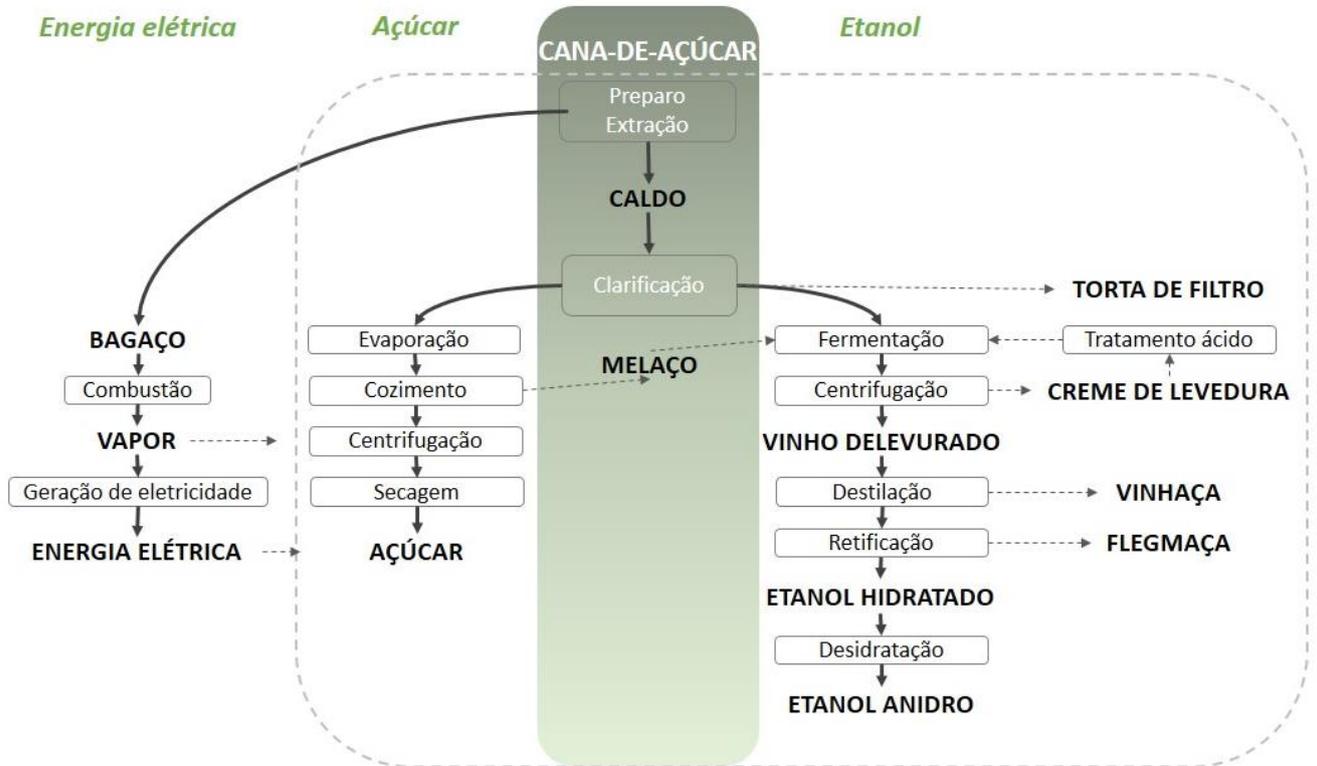
Figura 33. Processo de recuperação de açúcares por meio de filtro rotativo à vacuo.



Fonte: FRANCISCO, 2018.

O caldo clarificado, por sua vez, pode ser direcionado para a destilaria (fermentação alcoólica) ou aos evaporadores para a retirada do excedente de água (ajuste do teor de açúcares totais). Neste caso, o vapor resultante da concentração do caldo é denominado vapor vegetal e, após o evaporador, o caldo clarificado será então direcionado à etapa de fermentação. Após a fermentação, o vinho obtido é direcionado às colunas de destilação (MANOCHIO *et al.*, 2017). O processo simplificado (fluxograma) de produção de etanol a partir da cana pode ser representado na Figura 34.

Figura 34. Fluxograma de produção de etanol e açúcar a partir de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de BNDES; CGEE, 2008; MANOCHIO *et al.*, 2017).

2.4.3. Fermentação alcoólica

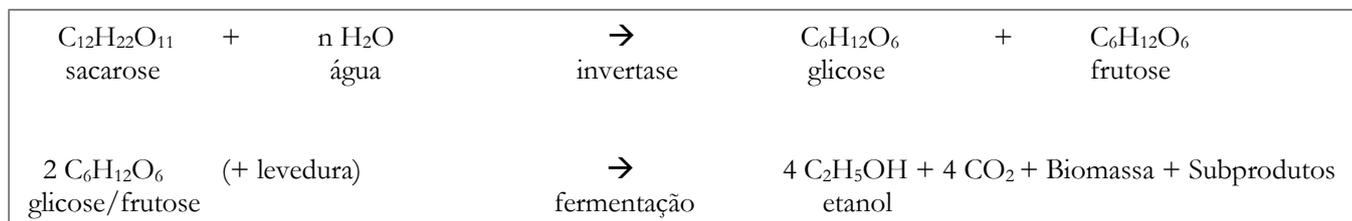
Como é de conhecimento, a via de obtenção de etanol através da fermentação por leveduras é a mais utilizada. As leveduras são consideradas seres anaeróbios facultativos, ou seja, são capazes de crescer na presença ou na ausência de oxigênio.

Os açúcares presentes no caldo de cana são sacarose, glicose e frutose. A sacarose é um dissacarídeo composto por uma molécula de glicose e uma molécula de frutose, unidas por ligação glicosídica. Embora a sacarose não seja um monômero, a própria levedura produz a enzima invertase – a qual é responsável pela hidrólise (inversão) extracelular da sacarose em glicose e frutose (LIMA *et al.*, 2001).

Uma vez invertida a sacarose em açúcares redutores, a partir da estequiometria formulada por Gay-Lussac, pode ser obtido até 51,1% de etanol e 48,9% de CO₂ em base mássica, em relação a glicose e/ou frutose metabolizada - e ainda são produzidos na glicólise dois moles de ATP (adenosina trifosfato) por mol de glicose e/ou frutose, usados para a manutenção energética das células (LIMA *et al.*, 2001).

Na fermentação alcoólica, enzimas presentes na levedura fazem a bioconversão

anaeróbica de açúcares fermentescíveis provenientes do caldo de cana em etanol. Trata-se, portanto, de um processo bioquímico de formação de etanol. Além de produtos secundários, tais como dióxido de carbono, ácidos, entre outros (WYMAN; HINMAN, 1990; INGLEDEW *et al.*, 2009c).



No processo convencional de produção de etanol de cana tem-se como agente de fermentação a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, fungo unicelular. A atividade metabólica da levedura é iniciada com o preparo do pé-de-cuba. As leveduras recuperadas por meio de reciclo, por sua vez, são tratadas com ácido, biocidas, e então são redirecionadas à dorna como creme de levedura (BASSO *et al.*, 2011).

O processo de fermentação é conduzido em dornas de fermentação (reatores de fermentação alcoólica), por meio da adição do pé-de-cuba e do caldo em concentrações ideais para a fermentação alcoólica e produção de etanol.

O dióxido de carbono produzido na fermentação pode carrear etanol e, por isso, tornou-se usual a lavagem de gases a fim recuperar moléculas de etanol que estejam em arraste e perda para a atmosfera (RODRIGUES *et al.*, 2018). Outra alternativa, inclusive mais coerente ao se relacionar as questões de emissões de CO_2 à atmosfera, seria a recuperação do próprio dióxido de carbono (não apenas o etanol, recuperado em lavagem de gases) de forma a ser ofertado a outros processos – produção de bebidas gaseificadas por exemplo.

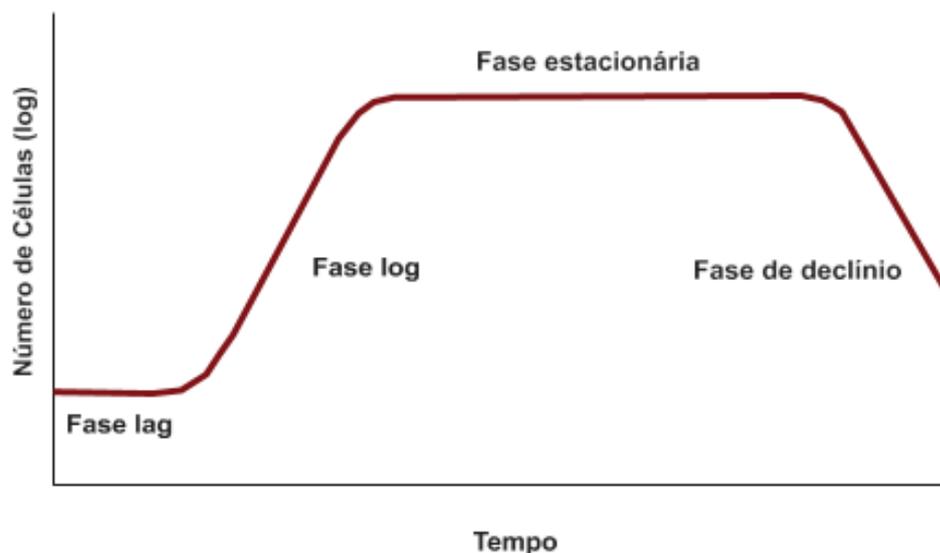
2.4.3.1. Processo contínuo

A fermentação contínua é conduzida por meio da alimentação contínua de mosto no primeiro reator de fermentação em condições e teores de açúcares ajustados de forma a favorecer o metabolismo das leveduras e transformação dos açúcares em etanol. Em vazão correspondente, tem-se a remoção do vinho (fermentado) no último reator - de forma a equilibrar o sistema e mantê-lo em atividade constante (fluxo contínuo) ao longo da safra. Tal condição possibilita maior aproveitamento da estrutura industrial e permite a obtenção de processo e produtos mais homogêneos (INGLEDEW *et al.*, 2009c).

2.4.3.2. Batelada alimentada

A batelada alimentada, por sua vez, é o processo mais utilizado na produção brasileira de etanol. Na batelada alimentada o mosto é adicionado gradativamente ao reator, de forma a minimizar qualquer pressão osmótica sobre as células de levedura em atividade metabólica. Deste modo, é também possível manter o crescimento das leveduras em fase exponencial (Figura 35) e permitir maior performance do microrganismo na realização do processo fermentativo – produtividade, rendimento e eficiência (INGLEDEW *et al.*, 2009c).

Figura 35. Curva típica (cinética) de crescimento da população de leveduras.



Fonte: Adaptado de Russell (2003).

2.5. Contaminantes em processos de produção de etanol

2.5.1. Fontes de contaminação

A eficiência do processo em que a levedura transforma açúcar em etanol está intimamente relacionada à qualidade do mosto a ser fermentado. Contudo, em escala industrial, este mosto é comumente infectado em seu processo de preparo, por meio de bactérias contaminantes e leveduras selvagens trazidas do campo junto a própria matéria-prima. E, como este substrato não é esterilizado durante seu preparo, esta condição afeta negativamente o processo em termos de eficiência e produtividade (STUPIELLO; HORII, 1981; LOPES, 2005).

2.5.2. Microrganismos contaminantes

A maior proporção das bactérias contaminantes do processo fermentativo para a produção de etanol são bactérias lácticas, provavelmente devido à sua maior capacidade em se adaptar às condições de baixo pH e altas concentrações de etanol, quando comparadas com os demais microrganismos (BASSO; BASSO; ROCHA, 2011).

A população de bactérias contaminantes em mosto para fermentação atinge níveis superiores a 10^7 células por mL (AMORIM; OLIVEIRA; CAMPOS, 1981), podendo chegar entre 10^8 a 10^9 células bacterianas por mililitro (ALTERTHUM *et al.*, 1984).

Além da contaminação bacteriana, outro microrganismo contaminante que exerce impacto importante no processo fermentativo são as leveduras selvagens (ROSE; HARRISON, 1993).

2.5.3. Efeitos da contaminação

A contaminação por bactérias é um problema recorrente de longa data na produção comercial de etanol combustível. As bactérias podem tanto produzir compostos inibidores ao processo fermentativo, quanto competir com as leveduras pelo consumo dos açúcares e nutrientes do mosto (SKINNER; LEATHERS, 2004).

Entre as principais perdas, a ocorrência de infecção no mosto causa queda da viabilidade celular e aumento da floculação de leveduras, bem como a formação de ácidos. Consequentemente, menor eficiência e produtividade do processo fermentativo (STUPIELLO; HORII, 1981; FREDERICK, 1994; OLIVA-NETO; YOKOYA, 1997; BONATELLI; IENCZAK; LABATE, 2019).

A população de bactérias contaminantes em mosto para fermentação em níveis superiores a 10^7 células por mL pode acarretar significativa queda no rendimento alcoólico - da ordem de até 55% do valor teórico esperado (AMORIM; OLIVEIRA; CAMPOS, 1981).

Contaminações entre 10^8 a 10^9 células bacterianas por mL de mosto podem provocar quedas de até 90% do rendimento alcoólico (ALTERTHUM *et al.*, 1984) e uma possível queda de produção entre 10 e 30 mil litros de etanol por dia - em destilaria com capacidade diária de produção de um milhão de litros (AMORIM *et al.*, 2011).

A competição de leveduras selvagens com as leveduras selecionadas é outro problema. Essas podem dominar o processo devido ao seu caráter agressivo e ao fato de que muitas delas apresentam maiores tolerâncias aos efeitos do tratamento ácido e de antibióticos, bem como pelas

eventuais concentrações elevadas de açúcares e etanol no meio (ROSE; HARRISON, 1993).

Entre os principais problemas causados pela presença de leveduras selvagens estão os efeitos de floculação das células de levedura, formação de espuma excessiva, redução da viabilidade celular do fermento (antes e após o tratamento ácido) e, por consequência, quedas nos indicadores de produtividade e eficiência do processo (BASSO; BASSO; ROCHA, 2011).

A floculação causada pelas linhagens selvagens de levedura pode diminuir a eficiência de centrifugação do fermento. Tal efeito, acarreta uma série de outras perdas no processo de recuperação do fermento (Melle-Boinot), a saber: i. creme de levedura com menor concentração de células de levedura; ii. maior volume de vinho indesejavelmente direcionado ao tratamento ácido; iii. maior poder tamponante do creme de levedura, por consequência da diluição do creme em maior proporção de vinho; iv. maior dose de ácido necessária para tratamento ácido do creme de levedura; v. redução da viabilidade/morte de células de levedura durante tratamento ácido; vi. Maior custo na realização deste processo de tratamento ácido. Além disso, as leveduras floculantes ainda podem ter efeito de decantação das células de levedura no fundo das dornas de fermentação, também resultando em menor produtividade e eficiência do processo fermentativo (AMORIM *et al.*, 2011).

A contaminação ainda impossibilita a produção de um vinho com características microbiológicas semelhantes no decorrer da safra, o que dificulta a obtenção de alcoóis especiais, como o álcool neutro¹. Além disso, em função da falta de estabilidade no processo produtivo, por não se trabalhar em condições assépticas, técnicas e tecnologias possivelmente aplicáveis são impossibilitadas de se tornarem viáveis: tal como reciclo e sangria da mesma linhagem padrão de levedura (BRAZZACH,1970; NOLASCO JUNIOR, 2005).

2.6.Tratamento ácido do fermento e o reciclo das células de levedura

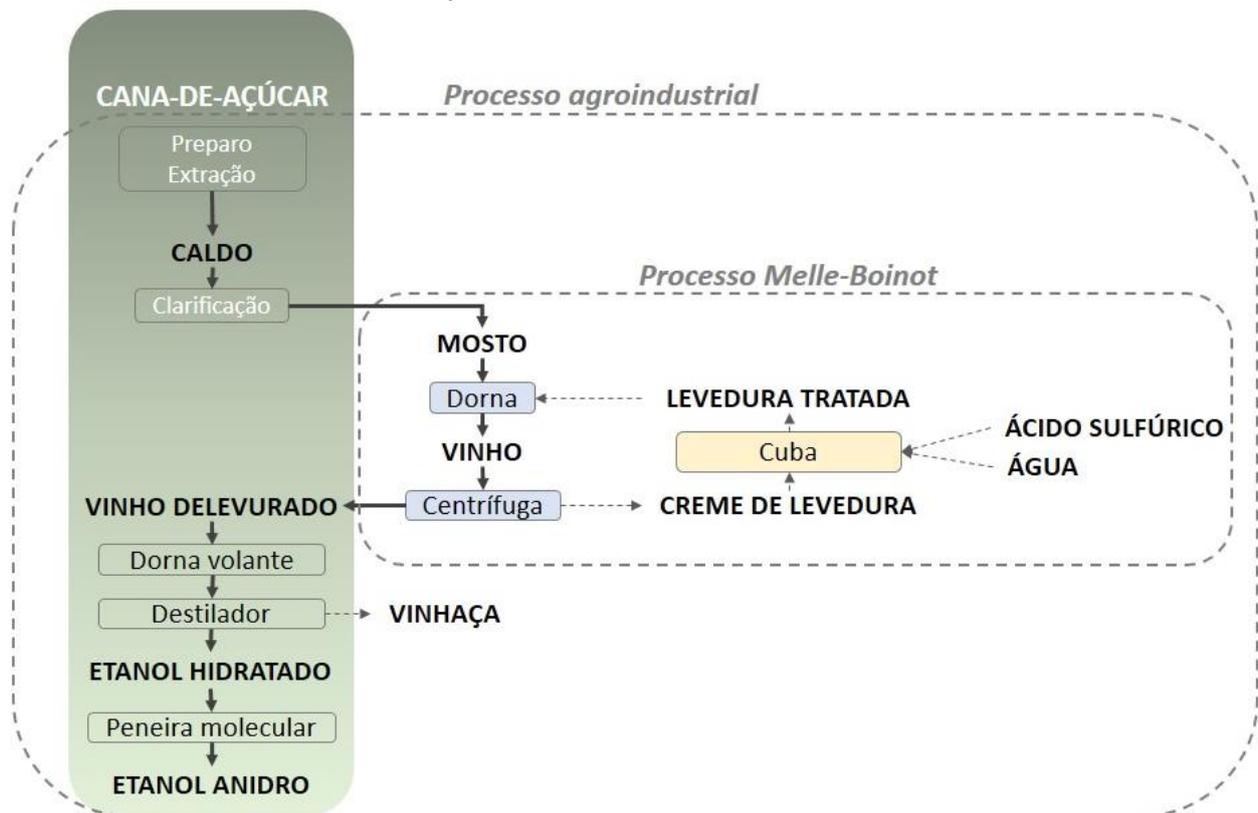
O processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar considera a recuperação do fermento utilizado (células de levedura). Para tal, a técnica consolidada e executada nas usinas brasileiras foi desenvolvida pelo francês Boinot na região de Melle, com objetivo de recuperação das células de levedura e tratamento ácido do fermentado para controle de contaminantes (VASECHI, 1944).

A técnica consiste na recuperação do fermento por meio da centrifugação do vinho final. Após recuperado, este fermento é então direcionado à fermentação de outro mosto, em condição

¹ Comunicação pessoal: Prof. Dr. Jorge Horii e Prof. Dr. Antonio Sampaio Baptista, 2010.

inicial de ciclo fermentativo (reciclo) - enquanto que o vinho de levedurado é direcionado à destilação (VASECHI, 1944; BASSO *et al.*, 2011; BAPTISTA, 2017) conforme representado na Figura 36.

Figura 36. Esquema representativo simplificado do processo Melle-Boinot de tratamento ácido e reciclo da levedura utilizada na fermentação alcoólica.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de BASSO *et al.*, 2011; BAPTISTA, 2017).

2.7. Produto e coprodutos

O mosto, após fermentado, passa a ser chamado de vinho e então é direcionado à etapa de destilação - na qual se extrai o etanol presente na mistura alcoólica. Esta operação é realizada em torres de destilação. O vinho é direcionado à coluna “A” e em contato com o vapor é então destilado. Obtém-se nesta primeira fase do processo: o flegma (45° a 50°GL), o flegma de alto grau (ou etanol de segunda) em menor volume (92 a 94°GL) e a vinhaça. O flegma é direcionado à coluna de retificação (coluna “B”) a fim de elevar o teor alcoólico. Desta coluna, é obtido o etanol hidratado (95,1°GL), flegmaça (subproduto da retificação do flegma) e óleo fúsel (impurezas do flegma) (DELGADO *et al.*, 2019).

Para produção do etanol anidro (99,5°GL), o etanol hidratado obtido na coluna “B” ainda deve ser direcionado para a coluna “C”, a qual, com auxílio do ciclohexano ou peneira molecular, são extraídas moléculas de água. O etanol anidro obtido, é então resfriado e direcionado aos tanques de armazenamento - para posterior comercialização.

O etanol obtido a partir do milho apresenta as mesmas características do etanol obtido a partir de cana-de-açúcar. Apenas a vinhaça obtida, entretanto, difere física (presença de particulados hidrolisados) e quimicamente (teores de minerais e demais sólidos solúveis) da vinhaça obtida em processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. Isto porque, convencionalmente na produção de etanol de milho, não há centrifugação do vinho para sangria e/ou reciclo do fermento (como é feito no processo de produção de etanol a partir de cana) - e as células de levedura seguem então junto ao vinho para a etapa de destilação (NOVOZYMES, 2019; ICM, 2021).

A ausência da etapa de centrifugação do vinho para recuperação do fermento, entretanto, faz com que a vinhaça deste sistema apresente composição heterogênea e um conteúdo protéico superior devido à presença de células de levedura (SCOT, 2020; ICM, 2021).

Por este motivo, no processamento do milho, essa vinhaça resultante é direcionada para separação das fases líquida e sólida. A fase líquida pode ser recuperada e utilizada no próprio processo, ou então ser destinada para fertirrigação da lavoura. A porção sólida (particulado hidrolisado de milho e células de levedura) é direcionada para o secador a fim de ser desidratada (ICM, 2021).

Esta composição sólida após desidratada, é denominada DDG (“*Distillers’ Dried Grains*”) ou, quando enriquecido com a fração líquida parcialmente desidratada da vinhaça, é denominado DDGS (“*Distiller’s Dried Grains with Solubles*” ou, em tradução livre, grãos desidratados de destilaria com solúveis) (NOVOZYMES, 2019; SCOT, 2020; ICM, 2021).

Embora quase todo o amido seja transformado em etanol por meio dos processos de hidrólise e fermentação, o DDGS tem teores de fibra e gordura aumentado em 300% em relação aos teores encontrados no milho (uma vez que um terço dos grãos introduzidos no processo saem como DDG), além de elevado teor de proteína – proveniente da presença de levedura (RFA, 2021).

Segundo Wyman *et al.* (1992), para cada tonelada de milho processada há a produção de aproximadamente 380 kg de DDGS. Este se apresenta como importante coproduto, o qual pode substituir fontes convencionais utilizadas na formulação de rações animais - tais como a soja e o próprio milho. Além disso, as fibras presentes neste material apresentam alta palatabilidade e digestibilidade para alimentação animal, podendo parcialmente substituir a utilização de forragens

e de concentrados (USGC, 2019; CHADDAD, 2016). Resultados do USDA (2022b) demonstraram que 1 t de DDG pode substituir cerca de 1,22 t de composto formulado a partir de farinha de milho e soja (HOFFMAN; BAKER, 2011).

Outro importante coproduto do processo é o óleo do milho, o qual tem rendimento aproximado de 12,5 kg por tonelada de milho processado e, assim como o DDGS, representa receita significativa para a viabilidade e atratividade dos projetos. Estima-se a produção de aproximadamente 164,7 mil toneladas de óleo de milho na safra 2022/2023 – aumento de 43% ante a safra anterior (UNEM, 2023).

Estes são coprodutos essenciais à viabilidade econômica dos projetos de produção de etanol de milho, por ter alto valor agregado em função de seu valor nutricional e palatabilidade quando destinado à nutrição animal (GRANDA; ZHU; HOLTZAPPLE, 2007).

No processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, além da vinhaça, disponibiliza-se a torta de filtro: proveniente do processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar; a cinza: resultante da queima do bagaço em caldeira; o próprio bagaço proveniente da biomassa; a energia elétrica: proveniente da geração excedente de energia elétrica; e a levedura: extraída do vinho por meio de centrifugação e sangria, disponibilizada de forma isolada (material puro) (BNDES; CGEE, 2008; COELHO *et al.*, 2020).

2.8.Receitas e custos

No processo convencional de produção de etanol a partir de milho, a matéria-prima é o principal componente na formação do custo de produção do etanol – aproximadamente 70% do custo de produção (CINELLI, 2012). A oferta de milho na região, a estrutura logística e de armazenagem, e a competitividade dos preços praticados são, portanto, fatores que irão impactar a viabilidade de investimento em uma indústria produtora de etanol de milho (IMEA, 2017; MIZIK, 2021).

Neves *et al.* (2021) levantou informações que indicam custo com a matéria-prima compondo 68% do custo total do processo, enquanto que os custos com cavaco de madeira como fonte de energia ao processo, os insumos químicos e biológicos e a mão de obra, contribuem nesta ordem, com aproximadamente 10%, 6% e 4% do custo total do sistema.

Tabela 15. Composição do custo de produção do etanol de milho.

Item	Custo (%)
Matéria-prima	65 a 70
Biomassa (energia)	10 a 15
Processo Industrial	17
Mão-de-obra/Administração	4

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de NEVES *et al.*, 2021; IMEA, 2022; PECEGE/ORPLANA/CNA *apud* PECEGE, 2022).

Por outro lado, em termos de receita (Tabela 16), os coprodutos têm contribuição significativa na composição do faturamento junto ao produto principal etanol. Deve-se, portanto, avaliar o cenário de mercado consumidor, demanda e escoamento dos coprodutos DDG(S), óleo de milho (o qual pode ser extraído da vinhaça anteriormente à desidratação), entre outros possíveis (BOTHAST; SCHLICHER, 2005).

Tabela 16. Contribuição de cada produto na composição da receita obtida pela unidade de produção de etanol de milho.

Produto	Receita (%)
Etanol	83 a 84
DDGS/WDG	9 a 13
Bio-óleo (bruto)	2 a 5
Energia	1
Outros	1

Fonte: Elaborado pelo autor (dados de PECEGE, 2020; IMEA, 2021; NEVES *et al.*, 2021; ABISA, 2022; CEPEA, 2022).

Os coprodutos são, portanto, essenciais à viabilidade econômica dos projetos de produção de etanol de milho por terem alto valor agregado. O DDGS apresenta elevado valor nutricional e palatabilidade quando destinado à nutrição animal (GRANDA; ZHU; HOLTZAPPLE, 2007).

A importância dos coprodutos da produção de etanol de milho vão além da composição de fatia importante da receita da unidade de produção. A geração de DDGS, por exemplo, impacta o preço de mercado de sua própria matéria-prima (grão de milho): a introdução deste coproduto

no mercado brasileiro desloca seus produtos substitutos destinados à nutrição animal, como milho e farelo de soja. A maior disponibilidade de DDGS, portanto, reduz a demanda e necessidade de área adicional de cultivo para soja e milho destinados exclusivamente à produção de ração animal (MOREIRA *et al.*, 2020).

Dados do IMEA (2022) demonstram que, entre janeiro de 2016 e janeiro de 2021, os preços do milho e do DDG cresceram 197,79% e 192,77%, respectivamente.

Todo este cenário onde a produção de etanol está associada à utilização de milho segunda safra como matéria-prima e geração de coprodutos, alivia a competição por terra e verticaliza a receita da região – além de alavancar a sustentabilidade ambiental do sistema de produção agrícola (CHADDAD, 2016).

Ainda, a este cenário acrescenta-se uma fonte adicional de receita ao processo: os créditos de carbono. A menor emissão de gases do efeito estufa no processo produtivo do etanol, em relação à gasolina (fóssil correspondente), pode gerar créditos de descarbonização (CBIOS) que poderão ser comercializados pela usina. Além de ser uma receita adicional à unidade de produção, a comercialização de títulos que representam práticas de sustentabilidade também aumentam a credibilidade da companhia ante o mercado, investidores e compradores - e traduzem de forma mais clara e evidente, toda a vantagem e responsabilidade ambiental, social e econômica presente no etanol (ANP, 2021a).

2.9.Sustentabilidade

Sustentabilidade é a condução de ações e práticas de forma isenta de impactos ou efeitos negativos ao meio ou sistema em momento subsequente (DYLLICK; HOCKERTS, 2002; SRIVASTAVA, 2007), o que pode ser traduzido como a utilização dos recursos de modo a servir as partes interessadas sem comprometer a capacidade de sobrevivência, desenvolvimento e perenidade das gerações futuras de fauna, flora e meio ambiente.

A busca contínua por redução de perdas e eficiência, estão entre os tópicos que proporcionam sustentabilidade nas organizações (NEVES; TROMBIN, 2017 *apud* NEVES *et al.*, 2021). Ainda mais, a utilização de recursos renováveis, autossuficiência em energia e o uso eficiente da água estão entre os tópicos abordados por estes mesmos autores e que compõem a dimensão ambiental da sustentabilidade.

Embora a produção de etanol de milho safrinha (segunda safra) seja algo relativamente recente no Brasil e ainda sujeita às adequações necessárias para a devida tropicalização da

tecnologia, já existem estudos que demonstram a sustentabilidade do biocombustível como renovável substituto à gasolina (MILANEZ *et al.*, 2014; DONKE *et al.*, 2017; MOREIRA *et al.*, 2020; ANP, 2021a).

Resultados práticos e observações demonstram maior concentração de carbono no solo e na vegetação quando sistemas de produção soja e milho são adotados, evidenciando que a expansão da produção de etanol de milho safrinha pode apresentar emissões negativas de GEE e então favorecer o processo de descarbonização (MOREIRA *et al.*, 2020). Tais observações podem ser corroboradas pelos resultados de performance e intensidade de carbono do etanol anidro produzido pela Usina FS no Programa Renovabio, o qual obteve NEEA (Nota de Eficiência Energético-Ambiental²) igual a 71,1 g CO₂eq MJ⁻¹ (ANP, 2021a).

Além disso, o etanol de milho segunda safra ainda detém atributos listados pelo IPCC (2018) para redução dos efeitos indesejáveis quanto ao uso da terra (crescimento exponencial de produtividade, rotação de culturas, acúmulo de carbono no solo, redução da degradação do solo, uso de áreas ociosas, uso de resíduos).

Também, além dos benefícios de se ter o milho safrinha como matéria-prima, o balanço de emissões relacionado à fonte de energia empregada ao processamento do milho e produção do etanol tendem a ser reduzidas nesta realidade tropical, uma vez que, conforme citado, pode haver a utilização de biomassa como fonte energética em detrimento das fontes fósseis utilizadas no processo convencional norte americano (ALEXANDER, 1985; COELHO *et al.*, 2020; EPE, 2022).

A análise do ciclo de vida (ACV) é a ferramenta amplamente empregada para avaliação da sustentabilidade de sistemas relacionados à produção de biocombustíveis. Esta leva em consideração o balanço energético, as emissões de gases durante o ciclo de vida, a viabilidade econômica e o impacto relacionado ao abastecimento de alimentos, embora usualmente aplicado com foco ambiental (COLLOTTA *et al.*, 2019). Historicamente, os estudos de ACV da produção de etanol de primeira geração indicam a etapa agrícola como o principal ponto de emissões de gases no ciclo de produção (FERRARI *et al.*, 2021).

2.9.1. Balanço energético

Independente da matéria-prima utilizada para produção de etanol, o processo de produção sempre demandará energia - especialmente nas formas de calor e eletricidade. Em alguns

² A Nota de Eficiência Energético-Ambiental faz referência à redução da emissão de GEE do biocombustível em comparação ao combustível fóssil substituto.

casos, uma parcela significativa desta energia pode ser suprida por resíduos da própria biomassa utilizada como matéria-prima.

Desta forma, quando da produção de etanol a partir de cana, o balanço energético do processo pode ser positivo: o bagaço e palha/palhiço da cana é queimado em caldeira e sua energia é convertida em energias térmica e elétrica – cujo excedente é comercializado como subproduto: bioeletricidade. Quando da produção de etanol a partir de milho, por outro lado, o processo industrial não pode ser beneficiado pelo resíduo da biomassa – uma vez que o resíduo vegetal da produção de milho não é significativa a ponto de manter a atividade da caldeira e, ao mesmo tempo, suprir a ciclagem de nutrientes no solo em que é produzido (CARVALHO *et al.*, 2017; MANOCHIO, 2017).

Neste sentido, o balanço energético de um biocombustível pode ser definido como a proporção entre a energia não renovável usada na produção de uma unidade energética do produto principal e de seus coprodutos (BATCHELOR; BOOTH; WALKER, 1995; LOPES, 2006), i.e., a relação entre a energia não renovável consumida e a disponibilizada em determinado sistema (COSTA; LORA, 2010).

Para chegar ao balanço energético, é necessário analisar sistematicamente os principais fluxos de energia nos processos produtivos envolvidos no ciclo de vida do combustível. Ou seja, conforme citado, os balanços energéticos e de GEE devem ser processados pela abordagem da Avaliação de Ciclo de Vida - ACV (NOGUEIRA, 1987; LOPES, 2006).

Trata-se de uma metodologia que considera todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de recursos naturais, a produção agrícola, o poder calorífico da biomassa, o processamento agroindustrial, até o uso e a disposição final dos produtos, incluindo as etapas intermediárias e de transporte (NOGUEIRA, 1987; LOPES, 2006).

O método permite avaliar o desempenho ambiental do produto, bem como identificar os estágios do seu ciclo de vida que contribuem de forma mais significativa à geração de impactos. Permite visualizar os aspectos ambientais do processo em estudo, bem como a visualização de gargalos para melhorias (COLLOTTA *et al.*, 2019).

Segundo RFA (2021), enquanto o etanol de milho produzido aos padrões norte-americanos disponibiliza entre 1,9 e 2,3 unidades de energia para cada unidade de energia fóssil usada em sua produção, o etanol de milho inserido nas condições e cenário tropical brasileiro, ou seja, processado com energia disponibilizada pela combustão da biomassa em caldeira, tem grande oportunidade de ter seu balanço energético significativamente elevado.

O processo convencional de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar pode disponibilizar até 9 unidades de energia para cada unidade de energia fóssil utilizada em sua produção, justamente pela utilização do bagaço de cana como fonte de energia ao sistema (BNDES; CGEE, 2008; MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008; WANG *et al.*, 2012).

2.9.2. Intensidade de carbono

Segundo a Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA, 2022), o processo convencional norte-americano de produção de etanol a partir de milho reduz as emissões de gases do efeito estufa em apenas 21% - em relação ao seu combustível fóssil equivalente. Já o processo convencional de produção de etanol de cana-de-açúcar reduz as emissões em 61%, o que o caracteriza como biocombustível avançado.

Ao considerar o etanol de milho brasileiro, caso o processo contemple a utilização de biomassa agroenergética e renovável como fonte de energia ao processo, além da possibilidade de utilização do milho safrinha como matéria-prima, a emissão de GEE pode se tornar negativa - ou seja, pode ocorrer a mobilização de carbono para cada unidade do biocombustível produzida (MOREIRA *et al.*, 2020).

2.9.3. Renovabio

Dentre as políticas públicas nacionais citadas, como ação mais recente, deve-se destacar neste trabalho o Programa Renovabio. Criado em 2016, foi motivado pela participação do Brasil no Acordo de Paris. Neste o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030 (ANP, 2019).

O Programa foi instituído pela Lei 13.576/2017 e reconhece o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética brasileira no que diz respeito à sua contribuição para a segurança energética, a previsibilidade do mercado e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de combustíveis. Estabelece metas individuais compulsórias de descarbonização, as quais são elevadas gradativamente a cada ano e deverão ser alcançadas por meio da substituição gradual do consumo dos combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, tais como etanol e biodiesel (MME, 2021a).

Neste sentido, o RenovaBio reúne as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) do Brasil no âmbito do Acordo de Paris. Seu objetivo é reduzir a intensidade de carbono da matriz energética de transporte, por meio da ampliação do uso de biocombustíveis e criando

um mercado de crédito de carbono para compensar as emissões de gases de efeito estufa pelos combustíveis fósseis (MME, 2021a).

O RenovaBio é composto por três eixos estratégicos. O primeiro eixo considera as metas nacionais de descarbonização estabelecidas pelo governo para os dez anos subsequentes, as quais se desdobram em metas individuais obrigatórias para os distribuidores de combustíveis - proporcionais às suas quotas no mercado dos combustíveis fósseis. O segundo eixo considera a certificação (voluntária) dos biocombustíveis pelos respectivos produtores, os quais são avaliados e recebem uma pontuação de suficiência energético-ambiental (Nota de Eficiência Energético-Ambiental, ou NEEA). Esta pontuação é o fator que multiplica o volume de biocombustível comercializado, e resulta no crédito de descarbonização (CBIO) que o produtor obteve e poderá comercializar - terceiro eixo (MME, 2021a).

Figura 37. Esquema conceitual da Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio.



Fonte: ANP, 2021.

Pelo Programa RenovaBio, os produtores de combustíveis renováveis devem buscar a certificação e avaliação de seu processo produtivo. Estas etapas são realizadas por meio de uma empresa certificadora credenciada à ANP. Este processo resulta em uma nota dada a cada usina correspondente à redução de emissões de carbono resultante das ações deste produtor. Após certificada, a usina pode emitir créditos de descarbonização (CBIOs), sendo que cada crédito corresponde a uma tonelada de carbono que deixa de ser emitido à atmosfera (MME, 2021a).

Os CBIOs podem ser comercializados em bolsa de valores, disponíveis para qualquer comprador; as distribuidoras de combustíveis, entretanto, precisam adquirir uma quantidade mínima de CBIOs de acordo com suas metas individuais (MME, 2021a).

A calculadora "RenovaCalc" é a ferramenta baseada na análise do ciclo de vida; mede a intensidade de carbono dos biocombustíveis ($\text{g CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$) e a compara com o seu equivalente em combustíveis fósseis, gerando a Nota de Eficiência Energético-Ambiental. Por meio da RenovaCalc, a contribuição dos diferentes biocombustíveis quanto à redução de emissões de GEE é devidamente identificada e mensurada, de forma que aqueles biocombustíveis que apresentam menor intensidade de carbono (em relação ao combustível fóssil líquido) gerarão mais CBIO por unidade de volume (MME, 2021a). Assim, quanto mais eficientes e sustentáveis são as práticas e particularidades do sistema de produção e produto obtido, mais CBIOs são nomeados à unidade produtora.

O RenovaBio estabelece, contudo, que a unidade de produção é elegível apenas quando a biomassa processada não é oriunda de áreas onde houve supressão da vegetação nativa. Além disso, é necessário a comprovação de que a biomassa foi produzida em conformidade com a legislação ambiental brasileira, i.e., a partir de áreas de produção devidamente regulares quanto ao Cadastro Ambiental Rural (CAR) (MME, 2021a).

A Resolução CNPE 8/2020 revisou excepcionalmente as metas de 2020 (que haviam sido estabelecidas no ano anterior) em função dos impactos, decorrentes da pandemia, no mercado de combustíveis. E, por meio da Resolução CNPE 17/2021 publicada, reafirmou-se as metas atualizadas de emissão de CBIOs até 2031 - por meio do RenovaBio.

Tabela 17. Metas de descarbonização segundo a Política Nacional de Biocombustíveis - Renovabio.

Ano	Meta anual (milhões CBIOs)
2022	35,98
2023	42,35
2024	50,81
2025	58,91
2026	66,49
2027	72,93
2028	79,29
2029	85,51
2030	90,67
2031	95,67

Fonte: ANP, 2021a.

O Renovabio se apresenta como programa de incentivo aos combustíveis renováveis e à sustentabilidade da produção, por meio da geração de crédito a sistemas eficientes e que favorecem a redução emissão de gases do efeito estufa – com rastreabilidade. O RenovaBio tem como objetivo principal o desenvolvimento: i. desenvolvimento dos biocombustíveis na matriz energética; ii. desenvolvimento sustentável da indústria. Oferta de produtos com qualidade e preço acessível ao consumidor (MELO, 2018).

Com dados da ANP (2021a), é possível correlacionar que se houvesse a contabilização da redução de emissões de CO₂eq desde a data de lançamento dos veículos automotores com tecnologia *Flex*, até outubro de 2021 teriam sido emitidos, somente no Brasil, 570 milhões de CBIOs. Assim, além do benefício ambiental, ao valor atual de R\$100 (valor médio 2022) por CBIO (B3, 2022) teriam sido movimentados cerca de 570 milhões de reais apenas provenientes de créditos de descarbonização.

Em 2020, foram comercializados aproximadamente 18 milhões de créditos de descarbonização (CBIOs) no Brasil. 15% acima da meta estabelecida pelo CNPE - Conselho Nacional de Política Energética (UNICA, 2020).

2.10. Controle dos microrganismos contaminantes presentes no mosto

O setor sucroenergético brasileiro tem buscado diversificar suas possibilidades: matérias-primas, processos e produtos. Porém, as atividades de processamento de cana-de-açúcar ainda prevalecem e estão concentradas em oito meses do ano, seguindo o modelo tradicional de produção (SILVA *et al.*, 2020; MILANEZ *et al.*, 2014).

Seguindo estes processos convencionais, entretanto, estas indústrias dispõem de alguns recursos para diminuir ou controlar ao máximo a contaminação: o tratamento ácido do creme de levedura. O uso de ácido sulfúrico e de biocidas são medidas que, embora estabilizem os níveis de contaminação bacteriana, não inativam toda a população de microrganismos contaminantes (CAETANO; MADALENO, 2011).

A utilização de radiação ionizante, por outro lado, pode eliminar eficientemente a população de microrganismos patogênicos e deteriorantes enquanto mantém as qualidades nutricionais e sensoriais do material (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; DEL MASTRO, 1999; PODADERA, 2007).

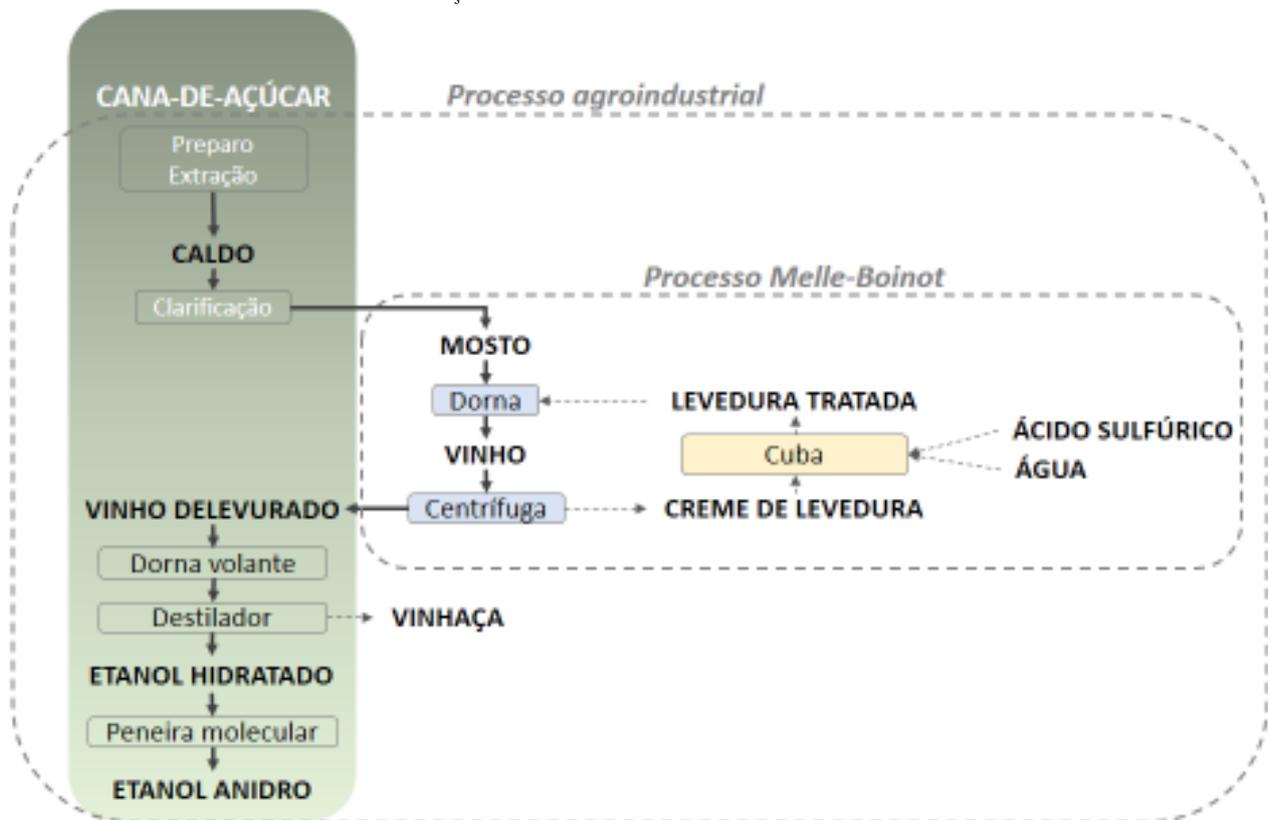
2.10.1. Melle-Boinot: tratamento ácido do fermento

O tratamento ácido do creme de levedura dá-se na etapa de recuperação do fermento (reciclo), momento em que há maior concentração de células de levedura - após a centrifugação do vinho ao final do ciclo fermentativo: processo denominado Melle-Boinot. Tal processo requer grande proporção de ácido sulfúrico com o objetivo de inativar grande parte da população de microrganismos contaminantes (BASSO *et al.*, 2008; DA SILVA-NETO *et al.*, 2020).

Feito isto, o creme de levedura torna a ser direcionado ao ciclo de fermentação seguinte, sucessivamente ao longo da safra. Tal procedimento é praticado para controle dos microrganismos contaminantes, porém, mesmo assim, não há inativação da população integral de contaminantes e algumas leveduras selvagens podem, inclusive, se apresentar mais tolerantes ao tratamento ácido e acabar por dominar o processo após alguns ciclos de fermentação (BROWN *et al.*, 2013; CECCATO-ANTONINI, 2018).

Este mesmo tratamento ácido também pode provocar a seleção de bactérias tolerantes e ainda provocar estresse osmótico nas células de levedura. Tal condição, faz com que a levedura produza glicerol como forma de tolerância à pressão osmótica e acidez do meio, podendo reduzir a eficiência da fermentação alcoólica (BASSO; BASSO; ROCHA, 2011).

Figura 38. Esquema representativo simplificado do processo Melle-Boinot de tratamento ácido e reciclo da levedura utilizada na fermentação alcoólica.



Fonte: Elaborado pelo autor (informações de BASSO *et al.*, 2011; BAPTISTA, 2017).

2.10.2. Biocida: dióxido de cloro para tratamento do fermento e mosto

Outra forma de controle de contaminantes no processo fermentativo é a utilização de antibióticos. Estretanto, esta alternativa também apresenta a possibilidade de resistência bacteriana aos efeitos do produto e conseqüente redução da eficiência de controle - além dos riscos de resíduos de antibiótico no fermento ao final do processo (MUTHAIYAN; LIMAYEM; RICKE, 2011). Nesta mesma linha, tem-se utilizado biocidas - os quais não deixam resíduos nos coprodutos finais, porém seu efeito é limitado se não utilizado em sinergia com o tratamento ácido do fermento.

2.10.3. Radiação ionizante: tratamento do mosto

Alternativamente aos métodos apresentados, podemos citar também a utilização de radiação ionizante para inativação dos microrganismos contaminantes presentes no mosto e, então, condução do processo em sistema fechado após assepsia. Neste caso, o excedente de energia elétrica disponibilizado pelo bagaço da cana é utilizado como fonte de energia para aceleração de

elétrons e a exposição do mosto à radiação é realizada em taxas controladas por um tempo determinado e com o objetivo previamente definido (FARKAS, 2006; CERVI *et al.*, 2019).

A radiação ionizante é formada por partículas de ondas capazes de remover os elétrons dos átomos, produzindo átomos ou moléculas com cargas, ou seja, íons. Também pode produzir moléculas e átomos excitados e, por esta razão, a radiação ionizante é capaz de iniciar ou induzir mudanças químicas: estas alterações reduzem ou eliminam eficientemente a população de microrganismos patogênicos e deteriorantes enquanto mantém as qualidades nutricionais e sensoriais do material (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; DEL MASTRO, 1999; PODADERA, 2007).

Trata-se de um método de tratamento em que se têm processos oxidativos avançados de componentes do material a ser beneficiado, reduzindo sua carga microbiana. O bombardeamento de um material por feixe de elétrons através dos aceleradores de elétrons é uma das técnicas mais efetivas no processamento por radiação ionizante (RELA, 2003).

Nobre, Horii e Alcarde (2007) consideram que o uso da radiação pode ser uma alternativa de descontaminação do mosto de cana-de-açúcar. E esta tecnologia tem sido testada com sucesso por diversos pesquisadores, como forma de controle de microrganismos em soluções açucaradas (ACOSTA; LODOS, 1982; ZELLER; OLIVEIRA; ZAGO, 1984; URBAIN, 1986; ALCARDE; WALDER; HORII, 2001; ALCARDE; WALDER; HORII, 2003; PODADERA, 2007).

2.11 Radiação ionizante: feixe de elétrons

Ao tratar sobre radiação ionizante, torna-se esclarecedor a exposição do conceito de alguns termos:

- Radiação: i. qualquer dos processos físicos de emissão e propagação de energia, seja por intermédio de fenômenos ondulatórios, seja por meio de partículas dotadas de energia cinética; ii. energia que se propaga de um ponto a outro no espaço ou num meio material; iii. energia que se propaga a partir de uma fonte emissora através de qualquer meio, podendo ser classificada como energia em trânsito (OKUNO, 2013).
- Átomo: denso núcleo carregado positivamente, e cercado por elétrons (carregados negativamente) em órbitas com estado de energia bem definidos (BOHR, 1913 *apud* SWARBRICK, 2007; CARDOSO, 2012).
- Íon: átomo ou molécula que se torna eletricamente carregado por ganho ou perda de elétrons (FELLOWS, 2018).

- Radiação ionizante: qualquer partícula ou radiação eletromagnética que, ao interagir com a matéria, direta ou indiretamente desloca elétrons dos átomos ou moléculas, produzindo íons (TAUHATA *et al.*, 2013; FELLOWS, 2018; CNEN, 2021).

A partir destas definições torna-se natural e evidente o entendimento de que a radiação ionizante é um processo que se passa em nível atômico. Ao atravessarem um material, estas radiações transferem energia para as partículas que forem encontradas em sua trajetória. Caso a energia transferida seja superior à energia de ligação do elétron com o restante da estrutura atômica, este elétron é ejetado de sua órbita e o átomo é momentaneamente transformado em um íon positivo. O elétron arrancado é então um íon negativo, o qual desloca-se no meio impulsionado pela energia cinética adquirida neste processo. Esta energia é dissipada através da interação do elétron com elétrons e núcleos de outros átomos, eventualmente encontrados em sua trajetória. Novos íons podem, assim, serem formados na matéria. O processo é interrompido quando, tendo sua energia dissipada em interações (choques), os elétrons acabam capturados por moléculas do meio (MOLINS, 2001; FELLOWS, 2018; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

2.11.1. Contextualização histórica

As radiações ionizantes existem desde a origem do Planeta Terra, sendo portanto um fenômeno natural. No início, as taxas de exposição a estas radiações eram certamente incompatíveis com a vida. Com o passar do tempo, os átomos radioativos, instáveis, foram evoluindo para configurações cada vez mais estáveis, através da liberação do excesso de energia armazenada nos seus núcleos. Pelas suas propriedades esta energia é capaz de interagir com a matéria, arrancando elétrons de seus átomos (ionização) e modificando as moléculas (FELLOWS, 2018; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

A Teoria Atomística foi edificada inicialmente no quinto século antes de Cristo, pelos filósofos gregos Leucipo e Demócrito (BOUTIER, 1936 *apud* MARTINS, 2021). Em sua Teoria, Demócrito afirma que o universo tem uma constituição elementar Cósmica que é o átomo: partícula indivisível, invisível, impenetrável e animada de movimento próprio. As vibrações dos átomos provocam todas as nossas sensações (MARTINS, 2021).

Em 1803 foi proposta por John Dalton a hipótese atômica, a qual somente no início do século XIX foi retomada por pesquisadores em química. Com a finalidade de interpretar as leis volumétricas de Joseph Louis Gay-Lussac, em 1811 Amadeo Avogadro, Conde de Quaregna e Cerreto estabeleceram a hipótese da existência de moléculas que correspondem ao agrupamento de átomos. Após 1834, a interpretação das leis de eletrólise, de Michael Faraday, permitiu a

conclusão de que átomos detém cargas elétricas. Em 1869, o químico russo Dmitri Mendeleiev apresentou a classificação periódica dos elementos na qual os átomos eram distribuídos em função dos seus pesos atômicos (MARTINS, 2021).

O primeiro modelo de átomo foi apresentado por Thomson, o qual mais tarde iniciou os estudos sobre elétron e, por meio da utilização de campos elétricos e magnéticos, também determinou a relação entre a carga e a massa das partículas constituintes dos raios catódicos - identificando-os como feixes de elétrons. Robert Andrews Millikan, físico americano, trabalhou entre os anos de 1909 e 1917 na determinação da carga do elétron e teve também grande importância para o desenvolvimento da física atômica (MARTINS, 2021).

Logo após a descoberta por Roentgen em 1895, a radiação ionizante foi mundialmente utilizada no campo da medicina como uma excelente ferramenta para o diagnóstico e a terapia. No final do século XIX, em função da utilização das radiações ionizantes em benefício do homem seus efeitos na saúde humana tornaram-se evidentes. Ao longo da história, estes efeitos foram identificados e descritos, principalmente, a partir de situações nas quais o homem encontrava-se exposto de forma aguda (acidentes e uso médico) (TAUHATA *et al.*, 2013; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

Atualmente, as tecnologias de irradiação estão muito bem estabelecidas e são usadas para esterilizar aproximadamente 45% dos produtos médicos de uso único utilizados mundialmente. A irradiação tem sido usada desde a década de 1960 para esterilizar dispositivos e equipamentos médicos de uso único - como alternativa aos processos de esterilização por calor ou via química. O potencial para usar radiação ionizante continua aumentando, à medida que a tecnologia se torna mais avançada. A indústria está cada vez mais envolvida com institutos de pesquisa e universidades, os quais estão conduzindo pesquisas e desenvolvimento de tecnologias neste sentido (IIA, 2020).

2.11.2. Aplicações

Embora ainda pouco divulgado os grandes benefícios da energia nuclear, a cada dia novas técnicas nucleares são desenvolvidas nos diversos campos da atividade humana, possibilitando a execução de tarefas difíceis ou até impossíveis de serem realizadas pelos meios convencionais. A indústria, a medicina e a agricultura são as áreas mais beneficiadas (CARDOSO *et al.*, 2021).

A irradiação de polímeros resulta em uma variedade de reações, incluindo reticulação, polimerização, enxerto ou degradação. Essas reações resultarão em mudanças nas características e no desempenho dos polímeros sintéticos as quais os tornarão, por exemplo, mais resistentes a altas temperaturas, desgaste e a produtos químicos, ou mais fáceis de processar. A modificação de

produtos poliméricos é a aplicação em maior escala da irradiação. Estes materiais poliméricos são utilizados para composição de uma variedade de outros produtos e materiais de alto desempenho (IIA, 2020).

A radiação ionizante é também aplicada em grande escala no tratamento de águas residuárias da indústria têxtil. Estima-se que o tingimento têxtil é responsável por um quinto do volume de águas residuárias industriais gerada em todo o mundo, e sua respectiva poluição. Neste sentido, além de seus efeitos químicos de descontaminação, a irradiação também tem a capacidade de dissociar poluentes orgânicos biologicamente ativos (IIA, 2020).

Na medicina, o uso de radiação ionizante é aplicado para esterilização de 45% dos suprimentos médicos de uso único, de forma a minimizar os riscos de infecção de pacientes durante cirurgia ou outro procedimento médico. Além de suprimentos médicos, os consumíveis de laboratório, ingredientes farmacêuticos, cosméticos e alimentares são também irradiados de forma a substituir ou minimizar a necessidade de métodos químicos (IIA, 2020).

No que se refere aos alimentos, os efeitos da irradiação continuam sendo intensamente estudados. Após mais de cinquenta anos de pesquisa internacional, há um consenso científico de que os alimentos irradiados são seguros para nutrição humana. As pesquisas têm sido extensas e consideram aspectos químicos, nutricionais, microbiológicos e sensoriais (IIA, 2021b).

Os estudos concluíram que as mudanças na composição química do alimento são mínimas. Tal como acontece com as outras formas de processamento, pode haver algum impacto sobre o teor de nutrientes - tal como vitaminas. Contudo, o tratamento de alimentos com radiação ionizante não apresenta riscos à saúde do consumidor e é um tratamento eficaz (IIA, 2020). Órgãos internacionais, tal como a OMS, afirmaram que os alimentos tratados com radiação ionizante não apresentam nenhum problema toxicológico, microbiológico ou nutricional específico (IIA, 2021b).

Outras aplicações diversas incluem a inibição de brotação em bulbos e tubérculos, inativação de parasitas (em carnes e saladas frescas), controle de infestação de insetos (em leguminosas, cereais, peixe seco), inativação de bactérias patogênicas como *Salmonella* ou *E. coli* (em frutos do mar, carne e aves refrigeradas ou congeladas), além da extensão do prazo de validade e *shelf life* de produtos (refeições prontas para consumo, algumas frutas e legumes) (IIA, 2020).

Portanto, quantidades controladas de radiação ionizante podem matar parasitas ou microrganismos, tais como bolores, leveduras e bactérias que causam deterioração ou intoxicação alimentar. E pode impedir que pragas se desenvolvam em produtos armazenados. A irradiação pode substituir satisfatoriamente o uso de alguns conservantes ou pesticidas, além de evitar o uso

de calor prejudicial – podendo ser aplicada em alimentos congelados ou frescos. A irradiação ainda pode penetrar em embalagens seladas, de forma que o risco de reinfestação ou recontaminação seja minimizado (IIA, 2021b). A partir da energia das radiações, células ou pequenos organismos podem então ser destruídos. Essa propriedade pode ser utilizada beneficemente quando empregada para destruir células ou microorganismos nocivos (PODADERA, 2007; CARDOSO *et al.*, 2021).

A inativação de microrganismos contaminantes em mosto a ser destinado para produção de etanol representaria grande avanço no estado da arte do processo. Poderia permitir o uso e manutenção de linhagens selecionadas de levedura ao longo de toda a safra, as quais com características desejáveis ao processo – ao invés de características relacionadas à tolerância ao estresse e ambientes de grande competição microbiológica. Além disso, seria possível reduzir custos por meio da eliminação do uso de antibióticos, antiespumantes, tratamento ácido do fermento, entre outros. É possível ainda, reduzir o tempo de reciclo da levedura (tratamento ácido torna-se desnecessário) e aumentar a produtividade do processo. Neste caso, a aplicação de radiação ionizante poderia representar otimização do processo de produção de etanol: aumento da eficiência, aumento da produtividade e redução de custos (NOLASCO JUNIOR, 2005).

2.11.3. Efeitos

Ao “arrancarem”, aleatoriamente, elétrons das camadas eletrônicas de átomos, as radiações ionizantes contribuem para romper, mesmo que momentaneamente, o equilíbrio entre as cargas positivas e negativas do átomo. À introdução de cargas elétricas livres em um meio irradiado, segue-se um rearranjo eletrônico que pode envolver elétrons de outros átomos e moléculas. Este rearranjo de elétrons tem como consequência o restabelecimento do equilíbrio perdido (FELLOWS, 2018; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

Sendo assim, a interação das radiações ionizantes com a matéria consiste na transferência de energia da radiação para o meio irradiado. Uma vez que a partir da interação dos átomos surgem as moléculas, quando um átomo perde elétrons toda a estrutura molecular pode ficar comprometida pelo rearranjo instantâneo de elétrons, na busca de uma configuração mais estável. Esta busca pode resultar numa perda de identidade química para a molécula envolvida, e na geração de moléculas estranhas ao meio (FELLOWS, 2018; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

Estas interações entre a radiação ionizante e a matéria podem ser classificadas como de modo direto ou indireto. A ação direta ocorre quando a radiação ionizante atinge diretamente uma parte do DNA ou outro elemento vital de uma célula, levando-a à falência. Enquanto que a ação

indireta ocorre quando componentes vitais das células são afetados por alguma espécie química altamente reativa, já formada após a interação da radiação com a água - causando a morte ou inviabilização da reprodução (MOLINS, 2001; SOARES, 2010; CAPODAGLIO, 2020).

2.11.3.1. Efeito direto

Considerando que as moléculas biológicas são constituídas, principalmente, por átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, são estes átomos que detém maiores probabilidades de ter seus elétrons arrancados no caso de irradiação de um organismo. O processo de ionização segue o mesmo princípio descrito anteriormente para outros átomos, ou seja, para que ocorra ionização em um material biológico a energia da radiação deve ser superior ao valor da energia de ligação dos elétrons ligados aos átomos destes elementos. A transformação de uma molécula específica (DNA, RNA) pela ação direta das radiações leva a conseqüências que devem ser analisadas em função do papel biológico desempenhado pela molécula atingida, sendo que o efeito de qualquer transformação deve ser acompanhado nas células - unidades morfológicas e fisiológicas dos seres (MOLINS, 2001; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

Um possível rompimento na molécula de DNA resulta na perda da integridade física do material genético, ou seja, a mensagem codificada no DNA pode sofrer alterações pela ação das radiações ionizantes, e estas alterações podem resultar em diversos efeitos (NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

2.11.3.2 Efeito indireto

A partir da irradiação de um material, os produtos da ionização (íons, elétrons secundários, átomos e moléculas excitadas) subsequentemente perdem suas energias para o meio que o circundam e se revertem em estados estáveis de radicais livres. Estes radicais ao interagirem com as moléculas produzem oxidação, redução, dissociação e degradação (MOLINS, 2001; RELA, 2003; MILLER, 2006).

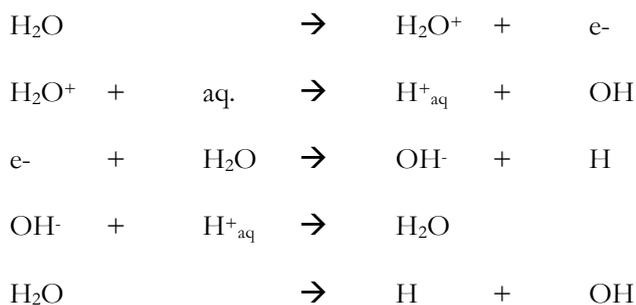
A molécula de água é a mais abundante em um organismo biológico, por participar da maior parte das reações metabólicas. Além disso há presença majoritária de moléculas de água em meios que se compõem como soluções aquosas. Em caso de exposição destas soluções às radiações, tais como são os mostos, as moléculas atingidas em maior número são, portanto, as moléculas de água. Tais moléculas são afetadas pelo fenômeno da radiólise: a chamada radiólise da água (RELA, 2003; TAUHATA *et al.*, 2013; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

2.11.4. Radiólise da água

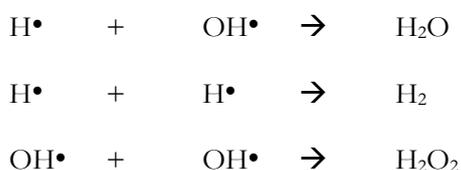
A hipótese de que a partir da interação da radiação ionizante com água são produzidos os radicais livres hidrogênio ($H\bullet$) e hidroxila ($OH\bullet$), foi primeiramente apresentada por Weiss (1944) e posteriormente confirmada em outros estudos (ARENA, 1971; BYAKOV; NICHIPOROV, 1990 *apud* JACOVONE, 2020).

Por meio da ionização da água segue-se um imediato rearranjo eletrônico e a possibilidade de produção de radicais livres: entidades químicas, altamente reativas em decorrência da presença de átomos cuja última camada não apresenta o número de elétrons que poderia conferir estabilidade à estrutura (PHILLIPS, 1961; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

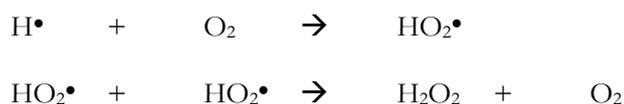
De acordo com Phillips (1961), a cada ponto em que ocorre a retirada de elétrons por meio da passagem da radiação ionizante pela água, os elétrons secundários formados podem possuir energia suficiente para futuras ionizações, sendo as reações seguintes uma representação simplificada do fenômeno radiólise da água:



Sendo formas altamente reativas, os radicais livres originados em decorrência da radiólise da água interagem quimicamente entre si ou com moléculas próximas a eles, “disputando” elétrons, danificando novas moléculas e reagindo com as biomoléculas - podendo danificá-las. Também podem combinar-se a ponto de formar moléculas ativas, tais como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ozônio (O_3), entre outros, os quais interagem com componentes do material irradiado, podendo reduzir ou oxidar as moléculas biológicas - tendo papel importante para desinfecção em função do poder de destruição de microrganismos, insetos e parasitas (PHILLIPS, 1961; RELA, 2003; TAUHATA *et al.*, 2013; FELLOWS, 2018).



O rendimento de hidrogênio molecular (H₂) e da água oxigenada (H₂O₂) na água pura é pequeno, devido à reação de recombinação de H• com OH•. Mas dentro da célula ou em presença de oxigênio, o H• se combina para formar o radical peroxil, que por sua vez se combina com outro para formar o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), tal como segue (PHILLIPS, 1961; TAUHATA, *et al.*, 2013):



2.11.5. Interação com microrganismos

No final do século XIX, Louis Pasteur descobriu que a inativação de bactérias diminui o alto potencial de infecções, as quais levam à morte ou a complicações durante procedimentos médicos. Foi neste momento que a inativação de microrganismos em dispositivos médicos e suprimentos passou a ter a devida importância. Da mesma forma, a inativação de microrganismos em linhas de produção se fazem interessantes para evitar quadros de infecção e ineficiência de processos (SPERBER, 2009).

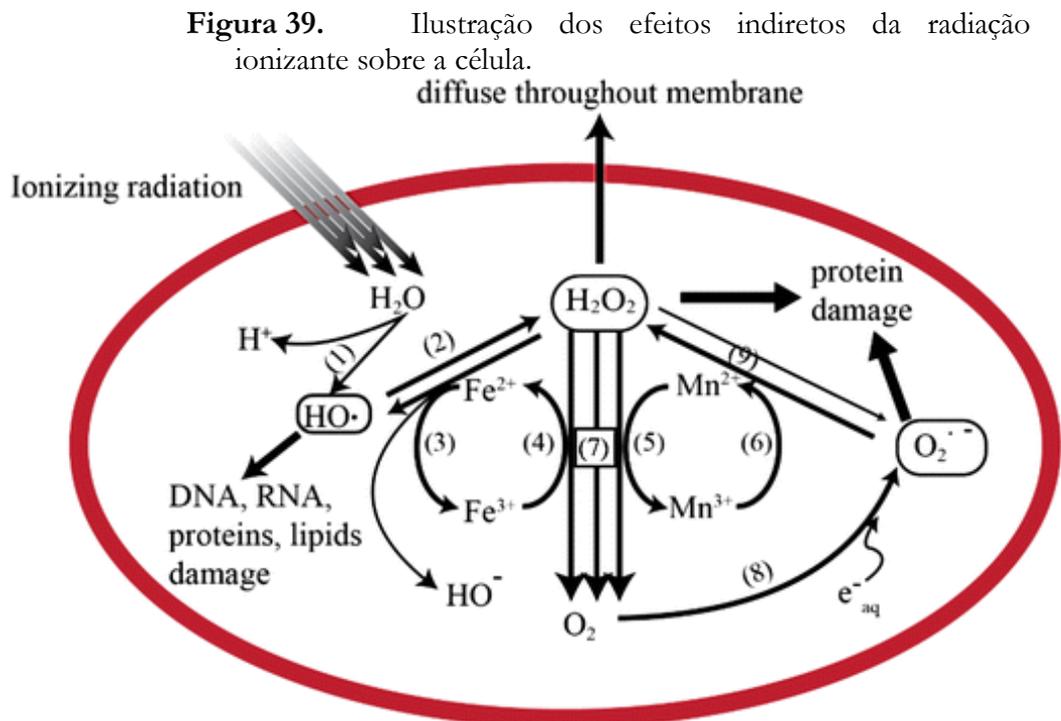
A interação da radiação ionizante com microrganismos relaciona-se diretamente com os efeitos biológicos, os quais refletem o conjunto de danos nos tecidos ou órgãos provocados pela penetração e consequente absorção da radiação ionizante (TAUHATA *et al.*, 2013). A radiação ionizante destrói os microrganismos indesejavelmente presentes em determinado produto, quebrando suas cadeias moleculares e reduzindo a carga microbiana presente no material (SOARES, 2010).

Por ser responsável pela codificação da estrutura molecular de todas as enzimas da célula, o DNA passa a ser a molécula chave no processo de estabelecimento de danos biológicos (MOLINS, 2001). Ao sofrer ação direta das radiações (ionização) ou indireta (através do ataque de radicais livres) a molécula de DNA expõe danos por mutações gênicas ou “quebras” (LUNG *et al.*, 2015; NOUAILHETAS; ALMEIDA; PESTANA, 2021).

Por meio da irradiação do material, um fóton de energia ou um elétron atinge o material genético da célula e causa uma lesão no DNA. A lesão pode ser a quebra de apenas uma hélice simples do DNA ou, se o DNA estiver devidamente alinhado, a energia pode até quebrar a dupla hélice. A lesão na hélice simples pode não ser letal e dela pode resultar em mutações. No entanto, um grande número de lesões na hélice simples do DNA pode exceder a capacidade de reparo da célula microbiana, o que resulta em morte celular (DICKSON, 2001; LUNG *et al.*, 2015).

Há também as interações das radiações ionizantes com moléculas adjacentes ao material genético e a química da radiólise da água: a radiação provoca a perda de um elétron na molécula de água, produzindo H_2O^+ e e^- . Estes produtos reagem com outras moléculas de água para produzirem inúmeros compostos, incluindo o hidrogênio e radical hidroxila, hidrogênio molecular e oxigênio, bem como peróxido de hidrogênio. Os radicais hidroxilas (OH^\cdot) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) são altamente reativos e reagem com o ácido nucléico ligando-se quimicamente com a hélice simples em um outro ácido nucléico, e também se ligam no par de bases da hélice oposta. Desde que a localização da ionização na molécula de água seja aleatória, as subsequentes reações com ácidos nucléicos são aleatórias. A ação indireta pode resultar em lesões na hélice simples ou na dupla hélice, com os mesmos efeitos da ação direta (MOLINS, 2001).

A radiação ionizante causa alterações químicas nos compostos celulares de microrganismos, com consequências relevantes sobre a atividade celular. Entre os efeitos, as modificações no DNA da célula estão as mais importantes – por afetar funções vitais (MOLINS, 2001; URBAIN, 1986).



Fonte: PODADERA, 2007.

As alterações químicas sobre o material orgânico irradiado são induzidas pela ação direta da radiação sobre macronutrientes e micronutrientes presentes no material. Ou, ação indireta, causadas por compostos intermediários reativos formados pela radiólise da água (PODADERA,

2007). O efeito da radiação ionizante sobre os microorganismos, tais como bactérias, fungos, vírus, algas e protozoários pode ser letal – pelos efeitos direto e indireto da radiação ionizante (FELLOWS, 2018; CAPODAGLIO, 2020).

Embora sabidas as formas de ação e interação da radiação ionizante, não é simples separar os efeitos devido a lesões no material genético e efeitos devido a lesões em material não-genético. Importante aspecto neste sentido, no entanto, é que as lesões não estão associadas apenas a uma região específica do material genético ou componente celular e isso é um ponto importante para a elucidação da resistência de certas bactérias, especialmente em relação a capacidade de microrganismos desenvolverem ou adquirem resistência à radiação (DICKSON, 2001).

Mesmo assim, os organismos vivos ainda apresentam diferentes níveis de tolerância aos efeitos biológicos das radiações ionizantes. A sensibilidade das células à radiação é diferenciada entre as espécies e ambiente de irradiação (radioprotetores). A diferença na sensibilidade dos microrganismos frente a radiação está relacionada a diferenças em sua estrutura química e física e na sua capacidade em se recuperar dos danos causados pela irradiação (PODADERA, 2007). Cada forma celular individual de espécies exibe nítidas diferenças quanto ao comprimento, número e amplitude das espirais e na rigidez das paredes celulares, refletindo em diferentes níveis de tolerância aos efeitos biológicos das radiações (PODADERA, 2007; TAUHATA *et al.*, 2013).

Em geral, quanto maior a complexidade orgânica, estrutural e neurológica, menor a resistência do organismo (TAUHATA *et al.*, 2013). Células mais complexas, com maior conteúdo de material genético (DNA/RNA) são mais sensíveis à radiação. Sendo assim, os vírus são menos sensíveis que as bactérias, as quais por sua vez são menos sensíveis que os fungos. As principais lesões induzidas pela radiação no DNA intracelular são, então, as alterações químicas sobre a purina, pirimidina e desoxirribose e os danos físico-químicos que resultam na quebra simples ou dupla da estrutura do fosfodiéster (MOSELEY, 1989 *apud* BORRELY, 2019).

Por esta razão, a quantidade de energia requerida para controlar os microrganismos varia de acordo com a resistência da espécie e com o número de microrganismos presentes (PODADERA, 2007). Além disso, outros fatores como composição do meio, teor de umidade, temperatura durante a irradiação, presença ou ausência de oxigênio, se o produto está fresco ou congelado, influenciam na resistência à radiação - particularmente no caso de células vegetativas (DEL MASTRO, 1999; VAN GERWEN *et al.*, 1999; FARKAS, 2006).

Algumas espécies de bactérias, quando submetidas a condições ambientais desfavoráveis - como escassez de nutrientes ou de água, ainda são capazes de formar estruturas denominadas esporos, ou endósporos, por um processo denominado esporulação, ou esporogênese: resultante

do processo de desidratação da célula bacteriana e da formação de uma parede grossa e resistente em todo o citoplasma desidratado. Desta forma, o esporo consegue suspender completamente a sua atividade metabólica, sobrevivendo a situações adversas como calor intenso e falta de água. Estas são estruturas das bactérias, cuja função é proporcionar resistência e garantir a sobrevivência do organismo em ambiente inadequado. Tendem a ser ainda mais resistentes a processos de inativação quando comparados a células vegetativas, inclusive em relação aos efeitos da radiação ionizante. Isto é, há necessidade de maiores doses de radiação ionizante para inativação de esporos a células vegetativas de bactérias (BORRELY, 2019).

No ataque da irradiação aos esporos verifica-se que danos nos esporos estão ligados aos radicais livres obtidos a partir da radiólise. Outros danos são atribuídos ao ataque em alvos como a membrana e/ou DNA do esporo. As lesões passam a permitir o vazamento dos líquidos da célula, bem como do material citoplasmático, com ações e danos aparentemente nas regiões internas e externas do esporo (BORRELY, 2019).

As radiações ionizantes já foram testadas com sucesso para o controle de agentes microbianos em soluções açucaradas (ZELLER; OLIVEIRA; ZAGO, 1984; PODADERA, 2007). Alcarde (2000) observou aumento na eficiência fermentativa em mostos tratados com radiação gama em doses entre 2 e 10 kGy, condição que possibilitou aumento no volume de etanol produzido de forma equivalente ao aumento observado com o uso agentes químicos – utilizados para redução da atividade de microrganismos contaminantes.

2.11.6. Interação com açúcares

A química da radiação dos carboidratos é complexa, uma vez que numerosos produtos radiolíticos são possíveis. Os produtos formados a partir de açúcares irradiados em fonte de Cobalto-60 (^{60}Co) e em acelerador de elétrons são semelhantes, porém a atmosfera em que ocorre a irradiação, o valor do pH, a temperatura do material, o conteúdo de água do produto, a dose irradiada e a taxa de dose irradiada são fatores que podem afetar os produtos formados (PHILLIPS, 1972; VAN GERWEN *et al.*, 1999).

A exposição à radiação é realizada em taxas controladas por um tempo exposição determinado e com objetivo previamente definido (FARKAS, 2006), e a dose empregada é um equilíbrio entre o que é necessário e o que pode ser tolerado no produto sem ocorrer mudanças indesejáveis (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; RELA, 2003; FARKAS, 2006). A radiação em soluções açucaradas pode levar a alterações de pH, rotação óptica, poder redutor, viscosidade e espectro de ultravioleta (PHILLIPS, 1972; PODADERA, 2007).

A penetração da radiação ionizante é inversamente proporcional a densidade do produto a ser beneficiado. Portanto, a espessura do material a ser tratado e sua densidade são fatores de grande importância para a determinação da dose a ser aplicada: quantidade de energia proveniente da radiação ionizante (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; RELA, 2003; FARKAS, 2006)

Dos radicais livres produzidos pela radiação em um sistema aquoso, o radical hidroxila (OH^\cdot) tem primordial importância na radiólise de açúcares. Ele atua removendo um hidrogênio ligado ao átomo de carbono e o radical formado pode reagir provocando a formação de outros compostos (NAWAR, 1986). Os produtos radiolíticos provenientes de carboidratos são principalmente ácidos e compostos carbonílicos, além de outros compostos altamente dependentes de condições específicas do meio (SCHERZ, 1970).

Embora haja semelhança entre os produtos formados pela interação de açúcares com raios gama e açúcares com elétrons acelerados (PHILLIPS, 1972), condições operacionais do processo em função da fonte de radiação adotada (fonte de Cobalto-60, acelerador de elétrons) também devem ser consideradas, tanto pelo aspecto econômico quanto pelas forma de controle e execução do processo (PHILLIPS, 1972; VAN GERWEN *et al.*, 1999; ALCARDE, 2000).

2.11.7. Irradiação de materiais

Radiações eletromagnéticas de ondas curtas com alta energia (gama ou raios x) ou de partículas de alta energia (elétrons), transferem sua energia para a matéria de forma contínua e com alta densidade. O processamento por radiação utiliza, portanto, a energia das radiações ionizantes (raios gama, feixe de elétrons ou raios x) para induzir efeitos químicos, físicos e biológicos nos produtos irradiados. A irradiação de materiais é uma alternativa de tratamento em que se têm processos oxidativos avançados de componentes do material beneficiado, podendo reduzir sua carga microbiana (RELA, 2003).

A quantidade de energia proveniente da radiação ionizante é denominada dose de radiação ou simplesmente dose, sendo medidos em grays (Gy) ou rad. A dose empregada é um equilíbrio entre o que é necessário e o que pode ser tolerado no produto sem ocorrer mudanças indesejáveis (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; RELA, 2003; FARKAS, 2006).

Em termos de energia, Gy equivale a um Joule de energia absorvida por quilograma de alimento (WHO, 1977). A dose de 1 kGy (ou 0.1 Mrad) aumenta a temperatura de 1 grama de água em apenas 0.268°C. Por isso, esta técnica também recebe o nome de processo frio (LAGUNAS-SOLAR; MATTHEWS, 1985; RELA, 2003; FARKAS, 2006).

A energia nem sempre é absorvida totalmente, devido à variedade de modos de interação e à natureza do material. Assim, por exemplo, uma quantidade da energia transferida pode ser captada no processo de excitação dos átomos, ou perdida por radiação de freamento (raios x) - cujos fótons podem escapar do material. A fração absorvida da energia transferida corresponde à ionização dos átomos, quebra de ligações químicas dos compostos e incremento da energia cinética das partículas (correspondente à conversão em calor) (TAUHATA *et al.*, 2013).

A dosimetria, então, é feita em função da quantidade de radiação que interage com a matéria, sendo a medida mais importante, a dose absorvida (D): quantidade de energia ($d\varepsilon$) que interage com uma certa quantidade de material (dm). Estabelece uma razão entre a energia média depositada pela radiação ionizante na matéria e a massa do volume atingido (RELA, 2003; TAUHATA *et al.*, 2013; BORRELY, 2019; CNEN, 2021).

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Equação 1

No qual:

D = dose absorvida, em gray (Gy);

$d\varepsilon$ = energia, em Joule (J);

dm = massa de material, em quilogramas (kg).

O equipamento ou dispositivo que auxilia no processo de dosimetria, para a medição da grandeza radiológica, é denominado dosímetro (CNEN, 2021). Os dosímetros podem ser utilizados em medições absolutas, como por exemplo, a câmara de ar livre, câmara cavitária de grafite ou a câmara de extrapolação. Nas medidas relativas, onde é necessário conhecer o fator de calibração (rastreamento metrológico) são muito utilizadas as câmaras tipo dedal (para fótons e elétrons), câmaras de placas paralelas (para raios x de baixa energia e elétrons de alta energia), câmaras esféricas de grande volume para proteção radiológica. Estes modelos descritos podem atuar como padrões de laboratórios, ser usadas em clínicas de radioterapia ou para dosimetria de feixes ou de indivíduos (TAUHATA 2013; CNEN, 2021).

Um nível de dose absorvida denominado valor $D10$ (ou dose $D10$) auxilia o processo de avaliação numérica da radiosensibilidade do microrganismo à radiação e refere-se à: dose capaz de

reduzir a população de microrganismos existente no produto irradiado em 90% da contagem inicial, ou um ciclo logarítmico. Assim, quando o produto absorve uma dose de radiação correspondente ao valor $D10$, a contagem inicial de microrganismos de uma população de 100.000.000 indivíduos, por exemplo, passa a ser 10.000.000 indivíduos (DIEHL, 1995 *apud* BORRELY, 2019; SOARES, 2010). A equação 2, de Stumbo, Murphy e Cochran (1950), é utilizada para calcular o valor $D10$.

$$D10 = \frac{D_i}{\text{Log } N_0 - \text{Log } N_f}$$

Equação 2

No qual:

D_i = dose de irradiação, em Gy;

N_0 = população inicial de microrganismos (UFC mL⁻¹); e,

$N_f = \ln(n/r)$, onde:

n = quantidade total de amostras irradiadas na dose D_i ;

r = quantidade de amostras que não apresentaram crescimento microbiano.

As atividades do serviço de uma planta de irradiação ou de um irradiador instalado na linha de produção industrial para fins de esterilização, desinfestação, desinfecção ou outra utilização, têm sua qualidade melhor reconhecidas se seguirem Boas Práticas de Fabricação - BPF, por meio do chamado “*Good Manufacturing Practice*” - GMP (SOARES, 2010). Tal prática possibilita mínima garantia de qualidade do processo, por meio de ações sistemáticas e planejadas, necessárias para proporcionar confiança adequada da estrutura, sistema, componente ou instalação – de forma a entregar resultados satisfatórios (CNEN, 2021).

2.11.8. Fontes de radiação

Conceitualmente, a fonte de radiação é o equipamento ou material que emite ou é capaz de emitir radiação ionizante, e os irradiadores são equipamentos que submetem uma determinada substância ou material à ação de um feixe de partículas ou radiações (TAUHATA, 2013; CNEN, 2021).

Após a primeira interação, o mecanismo de transporte de energia no interior do produto é o mesmo para os três tipos de radiação, prevalecendo os elétrons secundários (elétrons expulsos de suas orbitas) que produzem a maioria das excitações e ionizações, provocando os efeitos químicos. Portanto, o bombardeamento de produtos por radiação gama, raios x ou elétrons são técnicas efetivas no processamento por radiação ionizante, sendo, a principal diferença entre essas técnicas, o tipo da radiação primária que interage com o produto a ser tratado (PHILLIPS, 1972; RELA, 2003; SOARES, 2010).

Os tipos de radiações aqui brevemente descritas são radiações com energia suficiente para ionizar o meio onde interagem, sendo, como abordado anteriormente, classificadas como radiações ionizantes.

2.11.8.1. Radiação gama

A radiação gama é uma radiação na forma de onda eletromagnética originada da transição do núcleo de átomos instáveis. A instabilidade dos átomos é produzida em reator nuclear. A irradiação do Cobalto-60, por exemplo, é conseguida de forma artificial - ao submeter o Cobalto-59 (estável) a um reator nuclear. Este bombardeia o núcleo do átomo com um nêutron tornando-o Cobalto-60 (instável), emitindo um elétron (radiação beta) e duas ondas eletromagnéticas (radiação gama), sendo uma com energia de 1,17 MeV e outra com 1,33 MeV. Após o decaimento resulta o níquel-60, o qual é estável (SOARES, 2010). A radiação gama caracteriza-se pela alta penetração e baixa taxa de dose (kGy h^{-1}), o que resulta em maior tempo para irradiação de materiais (RELA, 2003).

2.11.8.2. Feixe de elétrons

Os elétrons são produzidos em aceleradores de elétrons, que podem ser definidos como sistemas onde se estabelece um potencial de alta voltagem entre um cátodo e um ânodo num tubo de vácuo. O cátodo emite feixe de elétrons, chamados raios catódicos ou feixes eletrônicos, que seguem o mesmo princípio do tubo de televisão, onde a grande diferença é que este último utiliza, aproximadamente, 25.000 volts de energia, enquanto o acelerador utiliza da ordem de milhões de volts. Os elétrons acelerados caracterizam-se pela baixa penetração e alta taxa de dose (kGy s^{-1}), o que reduz significativamente o tempo para tratamento do material (RELA, 2003).

2.11.8.3. Raios X

A geração dos raios x é feita em aceleradores, onde o feixe de elétrons incide sobre um alvo de material pesado, gerando os raios x - pelo efeito Bremsstrahlung. Este tipo de gerador caracteriza-se pela alta penetração e alta taxa de dose, porém apresenta eficiência significativamente baixa, sendo que não mais do que porcentagens da energia dos elétrons incidentes se convertem em energia na forma de ondas eletromagnéticas (RELA, 2003).

A determinação do tipo de irradiação (raios gama, feixe de elétrons ou raios x) é importante, bem como o estabelecimento do momento mais adequado para a irradiação de determinado produto nas diversas fases do processo ou produção (WHO, 1981; PODADERA, 2007). O uso da radiação ionizante para a inativação de microrganismos contaminantes presentes em solução açucarada, destinada à produção de etanol, se mostra como processo alternativo para o setor sucroenergético brasileiro. Contudo, segundo Alcarde (2000), é evidente a dificuldade do uso de uma fonte de elemento radioativo como, por exemplo, o ^{60}Co para a irradiação do caldo de cana nas indústrias alcooleiras. Tanto pelo aspecto econômico quanto pelo aspecto de escala e controle do processo. Uma outra fonte de radiação, o acelerador de elétrons, pode ser aplicável a estas indústrias.

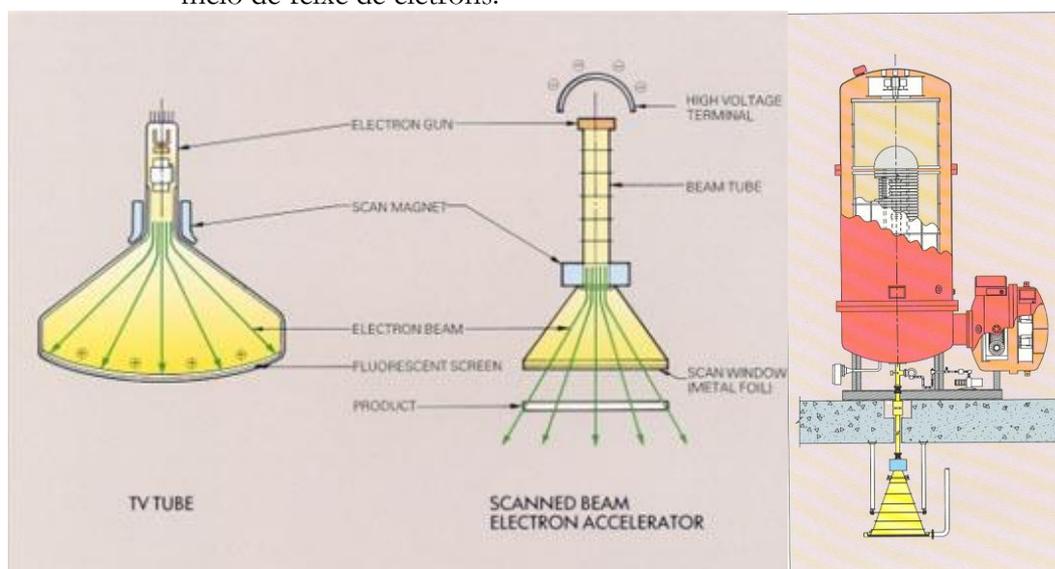
2.11.9. Feixe de elétrons

O feixe de elétrons é um tipo de radiação ionizante, o qual é produzido em aceleradores de elétrons. Inicialmente projetados para pesquisa científica, os primeiros aceleradores de elétrons utilizados para fins industriais foram instalados na década de 1950. Os aceleradores de feixe de elétrons estão agora em operação em diversas indústrias - principalmente para melhorar as propriedades físicas, químicas e microbiológicas dos materiais. Os elétrons acelerados são também utilizados para inativar microrganismos ou para reduzir a quantidade de patógenos ou subprodutos tóxicos em águas residuárias ou com poluição (IIA, 2021a).

Grande parte dos aceleradores industriais em operação no mundo estão instalados na própria linha de produção da indústria, embora existam máquinas operando em centros de serviço de irradiação de materiais, por contratação. Outros milhares de aceleradores de elétrons são utilizados em hospitais e clínicas para diagnósticos médicos ou para terapias contra tumores. Já é bem conhecida, portanto, a possibilidade de instalação do equipamento em unidades de produção (IIA, 2021a). No caso da agroindústria de produção de etanol, a instalação se faria na própria unidade de produção - de forma que o material seja tratado em estágio imediatamente anterior ao processo fermentativo.

Os aceleradores de elétrons são equipamentos duráveis e de origem elétrica, o que permite serem ligados ou desligados imediatamente - como qualquer outro equipamento elétrico industrial. Os aceleradores de elétrons podem ser definidos como sistemas no qual se estabelece um potencial de alta voltagem entre um cátodo e um ânodo, num tubo de vácuo. Por efeito termoelétrico, o cátodo emite feixe de elétrons chamados de raios catódicos ou feixes eletrônicos, que seguem o mesmo princípio do tubo de televisão. A principal diferença é que o tubo de televisão utiliza aproximadamente 25.000 volts de energia, enquanto o acelerador utiliza da ordem de milhões de volts. O esquema de funcionamento deste equipamento pode ser ilustrado na Figura 40 (RELA, 2003; CAPODAGLIO, 2020).

Figura 40. Esquemas básicos do dispositivo de irradiação por meio de feixe de elétrons.



Fonte: RELA, 2003; CAPODAGLIO, 2020; IIA, 2020.

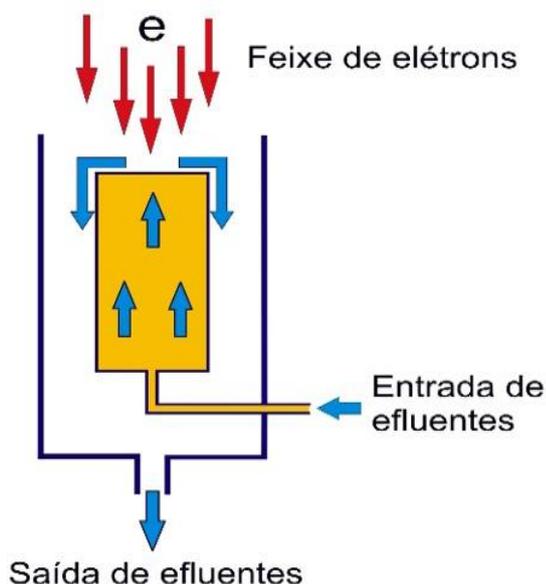
Os feixes de elétrons emitidos pelos aceleradores têm limites de energia espectral bastante estreitos (geralmente menos de $\pm 10\%$ da energia nominal). A energia com a qual os elétrons atingem o produto é ainda controlada por ímãs de flexão do sistema de controle do feixe, se aplicável. Ao contrário do fóton, o alcance de um elétron em um meio é finito e está intimamente relacionado à sua energia (IAEA, 2016). Ou seja, a espessura do material a ser tratado e a sua densidade são fatores determinantes na aplicação de elétrons acelerados. O poder de penetração do feixe de elétrons é menor que os raios gama, embora o processamento utilizando elétrons acelerados seja significativamente mais rápido em comparação ao processamento utilizando radiação gama (^{60}Co), em função das taxas de dose – fatores decisivos do ponto de vista técnico e operacional (RELA, 2003).

O tratamento do material com feixe de elétrons disponibiliza grandes quantidades de energia em um curto período de tempo. A taxa de dose é, portanto, alta - tipicamente kilograys por segundo (kGy s^{-1}), enquanto que fontes de irradiação gama apresentam taxa de dose na ordem de kilograys por hora (kGy h^{-1}). O rápido processamento é possível e essencial, tanto para se ter o efeito desejado (em polímeros, por exemplo) quanto para se alcançar a capacidade de tratamento necessária para tratamento de grandes volumes de efluentes e outros materiais (ALCARDE, 2000; IAEA, 2016; RELA 2003; IIA, 2020).

Outras características dos aceleradores de elétrons em relação a outras fontes radioativas também são importantes na definição da fonte de irradiação a ser utilizada, tais como: otimização do capital investido, custos operacionais, segurança de operação e nível de aceitação pelo público (ALCARDE, 2000; IAEA, 2016; RELA 2003; IIA, 2020).

Para o processamento, todo o material deve ser exposto ao feixe de elétrons e receber a dose mínima suficiente para se alcançar o efeito desejado. Para um melhor aproveitamento da energia dos elétrons emergentes do acelerador e para que a eficiência do processo não seja dependente do controle de espessura do produto a ser tratado, o sistema deve expor a solução a ser irradiada por meio de um fluxo em contra corrente ao feixe (*“up-flow stream”*), proposto por Rela (2003). Desta forma, a solução em tratamento se move continuamente em sentido vertical dentro de um duto, se apresenta ao feixe de elétrons e, após receber os elétrons acelerados, verte pelas laterais do duto de forma a recolher o material irradiado (RELA, 2003). O esquema de funcionamento deste equipamento está ilustrado na Figura 41.

Figura 41. Esquema básico do dispositivo de irradiação desenvolvido por Rela (2003).



Fonte: RELA, 2003.

Este dispositivo permite o controle do processo em tempo real, possibilitando o acompanhamento da eficiência do processo, o que garante, deste modo, que o mosto seja tratado de acordo com os parâmetros desejados: trata-se de um método tecnológico de tratamento em que se têm processos oxidativos avançados de componentes do material a ser beneficiado, reduzindo sua carga microbiana (RELA, 2003). A fixação de doses mínimas é de extrema importância quando se deseja eliminar organismos patogênicos (WHO, 1977; CRAWFORD; RUFF, 1996; PODADERA, 2007).

2.11.9.1. Aceleradores de elétrons

Tecnologias de radiação são aplicadas em diferentes ramos da economia mundial. Mais de 1500 aceleradores de elétrons estão em operação em todo mundo (BORRELY, 2019). Os aceleradores de elétrons industriais disponíveis no mercado mundial são projetados e fabricados para usos específicos, podendo-se classificar os aceleradores por faixa de energia, a qual que define suas características construtivas (RELA, 2003).

A energia dos elétrons expressa em milhões de elétron-volts (MeV) governa a profundidade de penetração na matéria. Para a maioria das aplicações industriais, a energia é limitada a 10 MeV a fim de permanecer abaixo do limiar onde radioisótopos de curta duração

poderiam ser criados no produto ou embalagem tratada. A massa e a carga elétrica dos elétrons reduzem sua capacidade de penetrar na matéria, sendo este o principal fator limitante da tecnologia. Contudo, os produtos são eficientemente tratados ao se determinar a capacidade de penetração de acordo com a densidade do produto (IIA, 2021a).

Os aceleradores de elétrons para aplicação industrial cobrem a faixa de energia de 0,3 MeV a 10 MeV, sendo que na faixa de 0,3 MeV a 0,5 MeV se encontram os aceleradores de baixa energia, tipo transformador: no qual o potencial de aceleração é obtido a partir de indução eletromagnética, como nos transformadores de tensão convencionais (RELA, 2003).

Entre as faixas de baixa e alta energia (0,5 MeV a 3 MeV) encontram-se as máquinas do tipo ICT (“*isolated core transform*”) e Dynamitron[®], fabricadas pela *Radiation Dynamics Inc.* USA. São máquinas do tipo DC (corrente direta) que por serem equipamentos industriais apresentam robustez e alta confiabilidade, permitindo uma disponibilidade operacional de no mínimo 8.000 horas por ano (RELA, 2003). Os equipamentos do tipo Dynamitron[®] são compostos por circuitos multiplicadores de tensão, em energias de até 5 MeV e correntes de até 160 mA (em baixa energia); centenas de equipamentos Dynamitron[®] são aplicados para obtenção de efeitos *cross-link* em fios e cabos de todo o mundo; e também é o modelo instalado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/IPEN – o qual foi utilizado para a condução deste estudo (RELA, 2003; IIA, 2021a).

Na faixa de 3,0 MeV a 10 MeV, encontram-se os aceleradores lineares, ou Linacs, e estão entre os aceleradores industriais de alta energia mais usuais. Neste, ondas eletromagnéticas são injetadas em uma cavidade formando um guia de onda, permitindo em seu interior o surgimento de campos elétricos que se repetem em fase com o deslocamento dos elétrons, acelerando-os até altas energias - próximo a 10MeV (RELA, 2003; SALVADOR, 2019; IIA, 2021a).

Ainda, o acelerador tipo Rodhotron, mais recentemente disponibilizado comercialmente, apresenta eficiência superior aos Linacs, onde os elétrons descrevem órbitas circulares a fim de incrementar energia a cada passagem pelo centro do acelerador, até serem direcionados ao alvo. Foi projetado principalmente para aplicação industrial, com energia entre 1 e 10 MeV e potência de saída de 700 kW (RELA, 2003; SALVADOR, 2019; IIA, 2021a).

A potência dos aceleradores de elétrons (expressa em quilowatts, kW) governa o rendimento, ou seja, a quantidade de produto que pode ser irradiada a uma determinada dose durante um determinado período de tempo – em toneladas por hora, por exemplo. Assim como a capacidade de penetração da energia na matéria, o rendimento também é significativamente influenciado pela densidade do material processado. A potência (P, em kW), a tensão de aceleração (U, em MeV) e a corrente de feixe (I, em mA) estão ligadas pela equação: $P = U \times I$ (IIA, 2021a).

Outro importante parâmetro é a largura do feixe de elétrons no acelerador, a qual é inversamente proporcional à energia ($Largura=1/Energia$). A dose absorvida pelo produto, por sua vez, pode ser ajustada pela velocidade de deslocamento do produto sob o feixe de elétrons (IIA, 2021a).

2.11.9.2. Vantagens do uso de feixe de elétrons

A irradiação de soluções açucaradas para inativação de microrganismos contaminantes se mostra como alternativa interessante para o setor sucroenergético brasileiro. A inativação de microrganismos ou esterilização pode ser considerada como uma etapa de processamento dentro do processo de fabricação (IIA, 2021a), sendo que o bombardeamento de um material por feixe de elétrons através dos aceleradores de elétrons é uma das técnicas mais efetivas no processamento por radiação ionizante (RELA, 2003).

Vale destacar que as doses de radiação praticadas para o tratamento de materiais não geram radioisótopos ou resíduos radioativos, o que representa relevante vantagem sobre fontes alternativas de radiação ionizante – tais como Cobalto 60. Conforme anteriormente mencionado, apenas compostos secundários à radiólise da água podem ser formados e mantidos em suspensão, tais como hidrogênio, oxigênio, peróxidos (SCHWARZ, 1981).

Vantagens como: i. possibilidade de aplicação de alta taxa de dose, permitindo o tratamento de maior volume de mosto por unidade de tempo; ii. menor custo de investimento inicial para se ter uma mesma capacidade de processamento que se teria utilizando-se de outra técnica; iii. maior facilidade no licenciamento e aceitação por parte da comunidade, já que a emissão de radiação é cessada assim que interrompida a alimentação de energia elétrica; iv. Facilidade de operação e controle da atividade do acelerador de elétrons (sistema “*on-off*”); fazem da tecnologia de aplicação de feixe de elétrons um método de tratamento ainda mais interessante para utilização na agroindústria (ALCARDE, 2000; ALCARDE; WALDER; HORII, 2001; RELA, 2003; PODADERA, 2007). Além disso, sua limitação quanto à baixa capacidade de penetração em materiais (LUNG *et al.*, 2015) é facilmente superada por meio da condição operacional em contracorrente - a qual expõe a solução em fina camada sob fluxo controlado (ALCARDE; WALDER; HORII, 2001; RELA, 2003)

Um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade é exatamente a busca por soluções que aumentem a eficiência do processo produtivo, em qualquer ramo de produção. Juntamente com a redução de custos para a realização de tal tarefa. Para o setor sucroalcooleiro, a redução da carga microbiana do mosto com o uso de radiação ionizante a partir de feixe de elétrons, se

apresenta como um processo tecnológico avançado para preparo da matéria-prima para a produção de etanol. Essa ferramenta em potencial já tem sido utilizada para reduzir a carga microbiana em outros materiais, tais como: grãos de cereais, águas residuárias e açúcares (RELA, 2003; PODADERA, 2007).

REFERÊNCIAS

- ABISA [Associação Brasileira da Indústria Saboeira]. Cotações 2019. 2022. Disponível em: <<https://abisa.com.br>>.
- ACOSTA, S.; LODOS, J. The action of gamma radiation on sugar cane as a new sterilization method. *Sugar y Azucar*, v. 77, 1982.
- ARENA, Victor. **Ionizing radiation and life: an introduction to radiation biology and biological radiotracer methods**. Saint Louis: Mosby, 1971.
- ALBERS, E; LARSSON, C; LIDÉN, G; *et al.* Influence of the nitrogen source on *Saccharomyces cerevisiae* anaerobic growth and product formation. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, n. 9, p. 3187–3195, 1996.
- ALBERS, Eva; JOHANSSON, Emma; FRANZÉN, Carl Johan; *et al.* Selective suppression of bacterial contaminants by process conditions during lignocellulose based yeast fermentations. **Biotechnology for Biofuels**, v. 4, n. 1, p. 59, 2011.
- ALCARDE, V.E.; YOKOYA, F. Efeito da população de bactérias na floculação de leveduras isoladas de processos industriais de fermentação alcoólica. STAB. **Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.21, n.4, p.40-43, 2003.
- ALCARDE, Andre Ricardo. Efeito da radiação gama em alguns parâmetros microbiológicos e bioquímicos da fermentação alcoólica. Piracicaba, 2000. 111p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.
- ALCARDE, Andre Ricardo; WALDER, Júlio Marcos Melges; HORII, Jorge. Comparison Between Gamma Radiation and Kamoran HJ in the Decontamination of Sugarcane Must. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 25, n. 2, p. 137–147, 2001.
- ALCARDE, Andre Ricardo; WALDER, Júlio Marcos Melges; HORII, Jorge. Fermentation of irradiated sugarcane must. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 677–681, 2003.
- ALVES, Denise Maria Gândara. **Fatores que afetam a formação de ácidos orgânicos bem como outros parâmetros da fermentação alcoólica**. Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- ALVES, D.M.G. Respostas fisiológicas de duas linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* frente ao potássio durante a fermentação alcoólica. Rio Claro, 2000. 118p. Tese (Doutorado) – Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- ALEXANDER, Alex G. **The energy cane alternative**. Amsterdam: Elsevier, 1985. (Sugar Series, 6).
- ALTERTHUM, F.; CRUZ, M.R.M.; VAIRO, M.L.R.; GAMBASSI, D.M. Efeito dos microrganismos contaminantes da fermentação alcoólica nas microdestilarias. STAB. **Açúcar Álcool e Subproduto**, v.3, n.1, p.42-49, 1984.
- AMERINE, M. A.; OUGH, C. S. *Methods for Analysis of Musts and Wines*. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 87, n. 4, p. 223–224, 1981.
- AMORIM, H.V.; OLIVEIRA, A.J.; CAMPOS, H. Infecção, problema sério na produção de álcool. In: **Congresso Nacional Da Sociedade Dos Técnicos Açucareiros Do Brasil**, 2., Rio de Janeiro, 1981. Anais. Piracicaba: STAB, 1981. p.158-168.
- AMORIM, Henrique V.; LOPES, Mário Lucio; DE CASTRO OLIVEIRA, Juliana Velasco; *et al.* Scientific challenges of bioethanol production in Brazil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 91, n. 5, p. 1267–1275, 2011.
- ANELLIS, Abe; BERKOWITZ, D.; SWANTAK, W.; *et al.* Radiation Sterilization of Prototype Military Foods: Low-Temperature Irradiation of Codfish Cake, Corned Beef, and Pork Sausage. **Applied Microbiology**, v. 24, n. 3, p. 453–462, 1972.

- ANELLIS, A.; KOCH, Robert B. Comparative Resistance of Strains of *Clostridium botulinum* to Gamma Rays. **Applied Microbiology**, v. 10, n. 4, p. 326–330, 1962.
- ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. **Preços**. 2022. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos?view=default>>.
- ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. **Lei nº 13.576, Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. 2021a. Disponível em: <www.anp.gov.br>.
- ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. Planilhas Renovacalc V.7 Aberta (Para análise e estudo de interessados). 2021b. Disponível em: <www.gov.br/anp>.
- ANP [Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis]. **RenovaBio**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>>.
- AOAC International (Org.). **Official Methods of Analysis**. 21. ed. [s.l.]: Oxford University PressOxford, 2019.
- ARORA, Salil; WU, May; WANG, Michael. Estimated displaced products and ratios of distillers' co-products from corn ethanol plants and the implications of lifecycle analysis. **Biofuels**, v. 1, n. 6, p. 911–922, 2010.
- BAI, F.W; CHEN, L.J; ZHANG, Z; *et al.* Continuous ethanol production and evaluation of yeast cell lysis and viability loss under very high gravity medium conditions. **Journal of Biotechnology**, v. 110, n. 3, p. 287–293, 2004.
- BAPTISTA, Antonio S. **Produção de Etanol a partir de Milho**, Material de Aula. 2017.
- BARBOSA, G. V. D. S **Contribuição do Melhoramento genético da cana-de- açúcar para a agroindústria de Alagoas**. 2014 113 p. Tese (Doutorado em produção vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BASSO, Luiz C.; DE AMORIM, Henrique V.; DE OLIVEIRA, Antonio J.; *et al.* Yeast selection for fuel ethanol production in Brazil. **FEMS Yeast Research**, v. 8, n. 7, p. 1155–1163, 2008.
- BASSO, Thiago O.; DE KOK, Stefan; DARIO, Marcelo; *et al.* Engineering topology and kinetics of sucrose metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* for improved ethanol yield. **Metabolic Engineering**, v. 13, n. 6, p. 694–703, 2011.
- BASSO, L. C.; BASSO, T. O.; ROCHA, S. N. Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and its Impact on Yeast Fermentation. In: **Biofuel Production- Recent Developments and Prospects**. [s.l.] IntechOpen, 2011. p. 85–100.
- BASSO, Luiz Carlos; ALVES, D. M. G.; AMORIM, Henrique Vianna de. The antibacterial action of succinic acid produced by yeast during fermentation. *Revista de Microbiologia*, v. 28, n. 1, p. 77-82, 1997.
- BATCHELOR, Sheila E.; BOOTH, Elaine J.; WALKER, Kerr C. Energy analysis of rape methyl ester (RME) production from winter oilseed rape. **Industrial Crops and Products**, v. 4, n. 3, p. 193–202, 1995.
- BAUER, Florian F.; GOVENDER, Patrick; BESTER, Michael C. Yeast flocculation and its biotechnological relevance. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 88, n. 1, p. 31–39, 2010.
- BAYROCK, Dennis P.; INGLEDEW, W. Michael. Inhibition of yeast by lactic acid bacteria in continuous culture: nutrient depletion and/or acid toxicity? **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 31, n. 8, p. 362–368, 2004.
- BECKNER, M.; IVEY, M.L.; PHISTER, T.G. Microbial contamination of fuel ethanol fermentations: Bioethanol contamination. **Letters in Applied Microbiology**, v. 53, n. 4, p. 387–394, 2011.
- BEHRENS, Werner; HAWRANEK, Peter M. **Manual for the preparation of industrial feasibility studies**. Newly rev. and expanded ed. Vienna: United Nations Industrial Development Organization, 1987.

- BELTRAME, Hélder. Usos e potencialidades da cana energia para a indústria sucroenergética. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2015.
- BERTHELIS, N; CORDERO OTERO, R; BAUER, F; *et al.* Discrepancy in glucose and fructose utilisation during fermentation by wine yeast strains. **FEMS Yeast Research**, v. 4, n. 7, p. 683–689, 2004.
- BEYERS, M. The influence of radiation on the chemical constituents of food. *Food Irradiation Information*, v.10, p.17-24, 1979. In: BEYERS, M.; BRODRICK, H. T.; VAN NIEKERK, W. C. A. (Orgs.). **Proceedings of the National Symposium on Food Irradiation**: Pretoria, Republic of South Africa, 4 - 5 October 1979. Pretoria: Atomic Energy Board, 1979.
- BNDES/CGEE [Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BRASIL); Centro de Gestão e Estudos Estratégicos]. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. 1a. ed. Rio de Janeiro: Departamento de Divulgação do BNDES, 2008.
- BISCHOFF, Kenneth M.; LIU, Siqing; LEATHERS, Timothy D.; *et al.* Modeling bacterial contamination of fuel ethanol fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 103, n. 1, p. 117–122, 2009.
- BISCHOFF, Kenneth M.; ZHANG, Yanhong; RICH, Joseph O. Fate of virginiamycin through the fuel ethanol production process. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 32, n. 5, p. 76, 2016.
- BONATELLI, Maria Letícia; IENCZAK, Jaciane Lutz; LABATE, Carlos Alberto. Sugarcane must fed-batch fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*: impact of sterilized and non-sterilized sugarcane must. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 112, n. 8, p. 1177–1187, 2019.
- BORRELY, Sueli Ivone. Utilização da Radiação Ionizante na Esterilização de Produtos: Radioesterilização, Disciplina. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/USP, 2019.
- BORTOLETTO, A. B.; ALCARDE, A. R. Dominante nos EUA, etanol de milho é opção, no Brasil, para safra excedente. *Biocombustíveis*, **Revista Visão Agrícola**. Edição n.13, p.135-137. 2015.
- BOTHAST, R. J.; SCHLICHER, M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 67, n. 1, p. 19–25, 2005.
- BRAZZACH, Milton Leoncio. **Emprego de desinfetantes quimicos em fermentacao de mosto de melaco de cana**. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo. 1970.
- BRESSIANI, José. Apresentação: Energycane Vertex – High Yield, Low Cost and Very Robust. Curso Bioenergia, USP-UNESP-UNICAMP. 2021.
- BREXÓ, Ramon Peres; SANT’ANA, Anderson S. Impact and significance of microbial contamination during fermentation for bioethanol production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 423–434, 2017.
- BRIGGS, A. The Resistances of Spores of the Genus *Bacillus* to Phenol, Heat and Radiation. **Journal of Applied Bacteriology**, v. 29, n. 3, p. 490–504, 1966.
- BROWN, Neil A.; DE CASTRO, Patrícia A.; DE CASTRO PIMENTEL FIGUEIREDO, Bárbara; *et al.* Transcriptional profiling of Brazilian *Saccharomyces cerevisiae* strains selected for semi-continuous fermentation of sugarcane must. **FEMS Yeast Research**, v. 13, n. 3, p. 277–290, 2013.

- BRYNJOLFSSON, A. Mathematical models for microbial kill by radiation, p.227–239, 1978. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS; WORLD HEALTH ORGANIZATION (Orgs.). **Food preservation by irradiation: proceedings of an International Symposium on Food Preservation by Irradiation**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1978. (Proceedings series - International Atomic Energy Agency, IEAE).
- BUCKERIDGE, M.S. **Comparação entre os sistemas fotossintéticos C3 e C4**. Material de Aula. Botânica, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- BUŠIĆ, Arijana; MARĐETKO, Nenad; KUNDAS, Semjon; *et al.* Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: a Review. **Food Technology and Biotechnology**, v. 56, n. 3, 2018.
- BYAKOV, V.M. NICHIPOROV, F.G. Radiolysis of Water in Nuclear Reactors, 1990.
- B3 [Banco B3 S.A.] Bolsa de Valores do Brasil. Produtos e Serviços ESG: Crédito de Descarbonização CBIO. 2022.
- CAETANO, A.C.G.; MADALENO, L.L. Controle de contaminantes bacterianos na fermentação alcoólica com a aplicação de biocidas naturais. **Ciência & Tecnologia: FATEC-JB**, Jaboticabal, v. 2, n. 1, p.27-37, 2011. ISSN 2178-9436.
- CAMPOS, Roberto de Moura. O potencial e a viabilidade econômica da geração de excedentes de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. Revista Brasileira de Energia, v.1, n. 3. 1990.
- CAPODAGLIO, Andrea G. Critical Perspective on Advanced Treatment Processes for Water and Wastewater: AOPs, ARPs, and AORPs. **Applied Sciences**, v. 10, n. 13, art. 4549, 2020.
- CARDOSO, E.M. A Energia Nuclear. Comissão Nacional da Energia Nuclear - CNEN, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Rio de Janeiro: 3Ed. 2012. 52p. Disponível em: <www.cnen.gov.br> Acesso em 11 de fevereiro de 2022.
- CARDOSO, E.M.; ALVES, I.P.; BRAZ, C.; PESTANA, S. Aplicações da Energia Nuclear. Comissão Nacional da Energia Nuclear - CNEN, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <www.cnen.gov.br> Acesso em 11 de fevereiro de 2022.
- CARVALHO, João Luís Nunes; NOGUEIROL, Roberta Corrêa; MENANDRO, Lauren Maine Santos; *et al.* Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181–1195, 2017.
- CARVALHO, Rodrigo S.; CRUZ, Ianny Andrade; AMÉRICO-PINHEIRO, Juliana Heloisa Pinê; *et al.* Interaction between *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus fermentum* during co-culture fermentation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 29, p. 101756, 2020.
- CASAL, Margarida; CARDOSO, Helena; LEAO, Cecilia. Mechanisms regulating the transport of acetic acid in *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbiology**, v. 142, n. 6, p. 1385–1390, 1996.
- CASEY, Gregory P.; MAGNUS, Carol A.; INGLEDEW, W. M. High-Gravity Brewing: Effects of Nutrition on Yeast Composition, Fermentative Ability, and Alcohol Production. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 48, n. 3, p. 639–646, 1984.
- CAVALETTI, Otávio; CHAGAS, Mateus Ferreira; SEABRA, Joaquim E. A.; *et al.* Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647–658, 2013.
- CECCATO-ANTONINI, Sandra Regina; BASSI, Ana Paula Guarnieri; PARALUPPI, Anna Livia; *et al.* Deterioration and fermentability of energy cane juice. **Ciência Rural**, v. 47, n. 9, 2017.

- CECCATO-ANTONINI, Sandra Regina. Conventional and nonconventional strategies for controlling bacterial contamination in fuel ethanol fermentations. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 34, n. 6, p. 80, 2018.
- CEPEA [Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada]. Preços. **CEPEA/ESALQ/USP**, 2022. Disponível em: <www.cepea.esalq.usp.br>.
- CERVI, Walter Rossi; LAMPARELLI, Rubens Augusto Camargo; SEABRA, Joaquim Eugênio Abel; *et al.* Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 391–399, 2019.
- CCEE [Câmara de Comercialização de Energia Elétrica]. Notas Técnicas e Painel de Preços: Histórico do Preço Médio Mensal. 2022. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>.
- CDC [*Centers for Disease Control and Prevention*]. **Methyl tert-Butyl Ether (MTBE) Factsheet: How People Are Exposed to MTBE and How MTBE Affects People’s Health**. Centers for Disease Control and Prevention, 2017. Disponível em: <https://www.cdc.gov/biomonitoring/MTBE_FactSheet>.
- CHADDAD, Fabio R. **The economics and organization of Brazilian agriculture: recent evolution and productivity gains**. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- CHERUBIN, Rudimar Antônio. **Efeitos da viabilidade da levedura e da contaminação bacteriana na fermentação alcoólica**. Doutorado em Microbiologia Agrícola, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- CINELLI, Bernardo A. Produção de etanol a partir da fermentação simultânea à hidrólise do amido granular de resíduo agroindustrial. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012. XVII, 183p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química, 2012.
- CNEN [Comissão Nacional de Energia Nuclear] – Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro. CNEN/DRS/DISEN. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <www.cnen.gov.br>.
- COELHO, Suani Teixeira; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim. Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo. IEE-USP, São Paulo. 2020.
- COLLOTTA, M.; CHAMPAGNE, P.; TOMASONI, G.; *et al.* Critical indicators of sustainability for biofuels: An analysis through a life cycle sustainability assessment perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109358, 2019.
- CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Acompanhamento de Safra Brasileira. 2023.
- CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Acompanhamento de Safra Brasileira. 2022.
- CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Acompanhamento de Safra Brasileira. 2021.
- CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Acompanhamento de Safra Brasileira. 2020.
- CONAB [Companhia Nacional de Abastecimento]. Série histórica das safras. 2020.
- CONSECANA [Conselho de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo]. Manual de Instruções CONSECANA-SP, 80p. 6ª edição, Piracicaba/SP. 2015.
- CORADI, Paulo Carteri; MALDANER, Vanessa; LUTZ, Éverton; *et al.* Influences of drying temperature and storage conditions for preserving the quality of maize postharvest on laboratory and field scales. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 22006, 2020.
- CORRADINI, Elisângela; LOTTI, Celso; MEDEIROS, Eliton S. de; *et al.* Estudo comparativo de amidos termoplásticos derivados do milho com diferentes teores de amilose. **Polímeros**, v. 15, n. 4, p. 268–273, 2005.

- COSTA, Ohana Yonara Assis; SOUTO, Betulia Moraes; TUPINAMBÁ, Daiva Domenech; *et al.* Microbial diversity in sugarcane ethanol production in a Brazilian distillery using a culture-independent method. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 42, n. 1, p. 73–84, 2015.
- COSTA, Rosélis E.; LORA, Electo E. S. *The energy balance in the production of palm oil biodiesel – two case studies: Brazil and Colombia*. Universidade Federal de Itajubá, Brasil. 2010.
- CRAWFORD, Lester M.; RUFF, Eric H. A review of the safety of cold pasteurization through irradiation. **Food Control**, v. 7, n. 2, p. 87–97, 1996.
- DA SILVA-NETO, José Machado; COVRE, Elizabete Aparecida; ROSA, Beatriz Costa; *et al.* Can ethanol partially or fully replace sulfuric acid in the acid wash step of bioethanol production to fight contamination by *Lactobacillus fermentum*? **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 37, n. 2, p. 323–332, 2020.
- D'AMORE, Tony; STEWART, Graham G. Ethanol tolerance of yeast. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 9, n. 6, p. 322–330, 1987.
- DANTAS, Djolse Nascimento. **Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- DHARMADHIKARI, M. Nitrogen metabolism during fermentation. *Vineyard and Vintage View, Mountain Grove, MO*. **2001**, v.17, p.5-7.
- DE LA TORRE-GONZÁLEZ, Francisco Javier; NARVÁEZ-ZAPATA, José Alberto; LÓPEZ-Y-LÓPEZ, Víctor Eric; *et al.* Ethanol tolerance is decreased by fructose in *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeasts. **LWT - Food Science and Technology**, v. 67, p. 1–7, 2016.
- DEL MASTRO, Nelida Lucia. Development of food irradiation in Brazil. **Progress in Nuclear Energy**, v. 35, n. 3–4, p. 229–248, 1999.
- DE MELO, H.F.; BONINI, B.M.; THEVELEIN, J.; *et al.* Physiological and molecular analysis of the stress response of *Saccharomyces cerevisiae* imposed by strong inorganic acid with implication to industrial fermentations. **Journal of Applied Microbiology**, v. 109, n. 1, p. 116–127, 2010.
- DELGADO, Afrânio A.; CESAR, Marco A.A.; SILVA, Fábio C.; ANTONELLI, Luiz G.A.L. Elementos de tecnologia e engenharia da produção do açúcar, etanol e energia. Piracicaba: FEALQ, 2019. 984p.
- DELLIAS, Marina de Toledo Ferraz; BORGES, Clóvis Daniel; LOPES, Mário Lúcio; *et al.* Biofilm formation and antimicrobial sensitivity of lactobacilli contaminants from sugarcane-based fuel ethanol fermentation. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 111, n. 9, p. 1631–1644, 2018.
- DIEHL, Johannes F. **Safety of Irradiated Foods**. New York: Marcel Dekker, 1995.
- DICKSON, J. S., **Radiation inactivation of microorganisms**, p.23-35. In: MOLINS, Ricardo A. (Org.). **Food irradiation: principles and applications**. New York: Wiley, 488p. 2001.
- DIJKEN, Johannes P.; SCHEFFERS, W.Alexander. Redox balances in the metabolism of sugars by yeasts. **FEMS Microbiology Letters**, v. 32, n. 3–4, p. 199–224, 1986.
- DONKE, Ana Cristina Guimarães. **Avaliação de desempenho ambiental e energético da produção de etanol de cana, milho e sorgo em uma unidade integrada, segundo a abordagem do ciclo de vida**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-13072016-092027/>.

- DOURADINHO, Rafael S.; MIRANDA, Filipe C.; LIMA, Roberta B.; BAPTISTA, Antonio S.; AGUIAR, C.L.; CRUZ, Sandra H. *et al.* Esterilização de mosto para produção de etanol. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química** – COBEQ, EBA/CBTermo. Foz do Iguaçu, Paraná. 2010.
- DOURADINHO, Rafael S.; LIMA, Roberta B.; MIRANDA, Filipe. C.; BAPTISTA, Antonio S. *et al.* Mosto esterilizado com elétrons acelerados. **Congresso Brasileiro de Microbiologia** – CBM. Foz do Iguaçu, Paraná. 2011.
- DUNCAN, Charles L.; COLMER, Arthur R. Coliforms Associated With Sugarcane Plants and Juices. **Applied Microbiology**, v. 12, n. 2, p. 173–177, 1964.
- DYLLICK, Thomas; HOCKERTS, Kai. Beyond the business case for corporate sustainability. **Business Strategy and the Environment**, v. 11, n. 2, p. 130–141, 2002.
- EIA [U.S. *Energy Information Administration*]. International Energy Statistics: Biofuels Production. 2022.
- EPA [United States *Environmental Protection Agency*]. Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard>>. 2022.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. - Brasília: EPE, 2020.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2021.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2022.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Disponível em <http://www.epe.gov.br>. Rio de Janeiro/RJ. 2016.
- FAIAD NETO, Cezar. Apresentação: Usina Flex Dedini - Cana/Milho, 2014.
- FAOSTAT. FAOSTAT database on agriculture. FAO - Food and Agriculture Organization. Organização das Nações Unidas, 2015.
- FARKAS, J. Irradiation for better foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 4, p. 148–152, 2006.
- FEDOREC, Alex J. H.; KARKARIA, Behzad D.; SULU, Michael; *et al.* Single strain control of microbial consortia. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1977, 2021.
- FELLOWS, Peter J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. São Paulo: Artmed, 2018.
- FERRARI, F. A.; NOGUEIRA, G. P.; FRANCO, T. T.; *et al.* The role of ionic liquid pretreatment and recycling design in the sustainability of a biorefinery: a sugarcane to ethanol example. **Green Chemistry**, v. 23, n. 22, p. 9126–9139, 2021.
- FERRARI, F.A. **Processing Lignocellulosic Feedstock Using Ionic Liquids for Biorefinery Application**. Delft University of Technology, 2021.
- FRANCISCO, Bruno. Material de apoio técnico. **Filtração do Lodo para a Produção de Açúcar**. 2018.
- FREDERICK, Marianne K. B. **Estudo genético, fisiológico e molecular de *Lactobacillus fermentum* envolvidos na floculação de leveduras**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.
- FUJII, Michihiro; HOMMA, Taira; TANIGUCHI, Masayuki. Synergism of α -amylase and glucoamylase on hydrolysis of native starch granules. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 32, n. 7, p. 910–915, 1988.

- GALLO, Claudio R.; CANHOS, V.P. Contaminantes bacterianos na fermentação alcoólica: revisão. *STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v.9, n.4, p.35-40, 1991.
- GALLO, Claudio R. Identificação de bactérias contaminantes da fermentação alcoólica. *STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos*, v. 10, p. 30-34, 1992.
- GALLO, Claudio R. **Determinação da microbiota bacteriana de mosto e de dornas na fermentação alcoólica**. Doutor em Ciência de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.
- GIBSON, Brian R.; LAWRENCE, Stephen J.; LECLAIRE, Jessica P. R.; *et al.* Yeast responses to stresses associated with industrial brewery handling: Figure 1. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, n. 5, p. 535–569, 2007.
- GOLDEMBERG, Jose; MACEDO, Isaias C. Brazilian alcohol program: an overview. **Energy for Sustainable Development**, v. 1, n. 1, p. 17–22, 1994.
- GOMES, Fernanda Sgarbosa. **Antagonismo entre leveduras e bactérias lácticas na fermentação alcoólica**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- GRANBIO. Cana Energia. Disponível em: <<http://www.granbio.com.br/en/conteudos/energy-cane/>>. Acesso em: 08 de abril 2018.
- GRANDA, Cesar B.; ZHU, Li; HOLTZAPPLE, Mark T. Sustainable liquid biofuels and their environmental impact. **Environmental Progress**, v. 26, n. 3, p. 233–250, 2007.
- GUTIERREZ, L.E.; ANNICCHINO, A.V.K.O.; LUCATTI, L. Capacidade fermentativa de *Saccharomyces cerevisiae* enriquecida com ácidos graxos. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 47, n. 2, p. 575–595, 1990.
- GUTIERREZ, L.E.; FERRARI, S.E.; ORELLI JR, A.A. Ácidos orgânicos de caldo de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) em quatro estádios de maturidade. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 46, n. 1, p. 41–52, 1989.
- HANG, Y. D.; LEE, C. Y.; WOODAMS, E. E.; *et al.* Production of Alcohol from Apple Pomace. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 42, n. 6, p. 1128–1129, 1981.
- HIBBING, Michael E.; FUQUA, Clay; PARSEK, Matthew R.; *et al.* Bacterial competition: surviving and thriving in the microbial jungle. **Nature Reviews Microbiology**, v. 8, n. 1, p. 15–25, 2010.
- HILL, Annie; STEWART, Graham. Free Amino Nitrogen in Brewing. **Fermentation**, v. 5, n. 1, p. 22, 2019.
- HOFFMAN, Linwood A.; BAKER, Allen J.; UNITED STATES. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. ECONOMIC RESEARCH SERVICE. **Estimating the substitution of distillers' grains for corn and soybean meal in the U.S. feed complex**. [s.l.]: U.S. Department of Agriculture, 2011.
- HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 45, n. 3, p. 253–267, 2001.
- IAEA [*Internacional Atomic Energy Agency*]. **Training manual on food irradiation technology and techniques**. 2. ed. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency, 1982. (Documentation. Division of Scientific and Technical Information, International Atomic Energy Agency. STI/DOC/10: Technical Reports Series, 114).
- IAEA [*Internacional Atomic Energy Agency*]. **The Radiation Chemistry of Polysaccharides**. Vienna: IAEA, 2016.
- ICM [ICM Inc.]. 2021. Disponível em <www.icminc.com>.
- IEA. **World Energy Outlook 2019**. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>>.
- IIZUKA, Hiroshi; SHIBABE, Sadami; ITO, Hitoshi. Gamma Irradiation on Fermentation Mashers Consisting Mainly of Cane Molasses. **Agricultural and Biological Chemistry**, v. 33, n. 4, p. 473–479, 1969.

- IGLESIAS, Carlos; SESMERO, Juan P. Economic Analysis of Supplementing Sugarcane with Corn for Ethanol Production in Brazil: A Case Study in Uberaba. **BioEnergy Research**, v. 8, n. 2, p. 627–643, 2015.
- IIA [*International Irradiation Association*]. Uses and Applications of Radiation Processing. 2020. Disponível em: <www.iiaglobal.com>.
- IIA [*International Irradiation Association*]. Electron Beam Technology. 2021a. Disponível em: <www.iiaglobal.com>.
- IIA [*International Irradiation Association*]. Food Irradiation. 2021b. Disponível em: <www.iiaglobal.com>.
- IMEA [Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária]. **Clusters de Etanol de Milho em Mato Grosso**. 2017.
- IMEA [Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária]. Dados disponibilizados. 2021.
- IMEA [Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária]. **Indicadores do Milho**. 2022. Disponível em: <http://www.imea.com.br/imea-site/indicador-milho>.
- INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KELSALL, D. R.; KLUHSPIES, C. The alcohol industry: how has it changed and matured? In: INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KELSALL, D. R.; KLUHSPIES, C. (Ed.). **The alcohol textbook**. 5th ed. Nottingham: Nottingham Univ. Press, 2009a. Chap.1, p.1-6.
- INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KRAUS, J. K. Commercial yeast production for the fuel ethanol and distilled beverage industries. In: INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KELSALL, D. R.; KLUHSPIES, C. (Ed.). **The alcohol textbook**. 5th ed. Nottingham: Nottingham Univ. Press, 2009b. Chap.11, p.127-144.
- INGLEDEW, W. M. Utilization of wort carbohydrates and nitrogen by *Saccharomyces carlsbergensis*. Technical Quarterly, Master Brewers Association of the Americas (MBAA). v.12, n.3, p.146-156, 1975.
- INGLEDEW, W. M. Yeasts: physiology, nutrition and ethanol production. In: INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KELSALL, D. R.; KLUHSPIES, C. (Ed.). **The alcohol textbook**. 5th ed. Nottingham: Nottingham Univ. Press, 2009c. Chap.9, p.101-113.
- INGLEDEW, W. M. Yeast stress in the fermentation process. In: INGLEDEW, W. M.; AUSTIN, G. D.; KELSALL, D. R.; KLUHSPIES, C. (Ed.). **The alcohol textbook**. 5th ed. Nottingham: Nottingham Univ. Press, 2009d. Chap.10, p.116-126.
- INGRAM, L. O. Adaptation of membrane lipids to alcohols. **Journal of Bacteriology**, v. 125, n. 2, p. 670–678, 1976.
- IPCC [*Intergovernmental Panel on Climate Change*]. **Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty**. 1. ed. [s.l.]: Cambridge University Press, 2018.
- JACOVONE, Raynara Maria Silva. **Estudo do comportamento eletroquímico do óxido de grafeno reduzido/Ni sintetizado por radiação ionizante**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- JERONIMO, Elisangela Marques; OLIVEIRA, Evelyn de Souza; SOUZA, Elson Luíz Rocha; *et al.* Addition of proteic nitrogen during alcoholic fermentation for the production of cachaça. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 2, p. 161–168, 2008.
- JOHN, Geraldine S. M.; GAYATHIRI, Murugesan; ROSE, Chellan; *et al.* Osmotic Shock Augments Ethanol Stress in *Saccharomyces cerevisiae* MTCC 2918. **Current Microbiology**, v. 64, n. 2, p. 100–105, 2012.
- JONES, Alison M.; THOMAS, Kolothumannil C.; INGLEDEW, W. Michael. Ethanolic Fermentation of Blackstrap Molasses and SugarCane Juice Using Very High Gravity Technology. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 42, n. 5, p. 1242–1246, 1994.

- KELSALL, D. R.; LYONS, T. P. Practical management of yeast: conversion of sugars to ethanol. In: JACQUES, Kathryn Ann; LYONS, T. Pearse; KELSALL, D. R. **The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries**. 4th ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2003. Chap.10, p.121-133.
- KHAN, A.R.; HOQ, M.M. Lactic acid bacteria as contaminant in alcohol fermentation. *Bangladesh Journal of Microbiology*, v.7, n.2, p.119-121, 1990.
- KOSIV, Ruslana; KHARANDIUK, Tetiana; POLYUZHYN, Lyubov; *et al.* Optimization of Main Fermentation of High-Gravity Wort. **Chemistry & Chemical Technology**, v. 10, n. 3, p. 349–353, 2016.
- KOVALCHUK, Svetlana; SHIYAN, Peter; MUDRAK, Tatiana; *et al.* INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NANOPARTICLES OF METALS ON FERMENTATION OF WORT OF HIGH CONCENTRATIONS. **EUREKA: Life Sciences**, v. 6, p. 51–56, 2017.
- KRAUS, J. K.; SCOPP, R.; CHEN, S. L. Effect of Rehydration on Dry Wine Yeast Activity. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 32, n. 2, p. 132–134, 1981.
- KRISHNAN, M.S.; TAYLOR, F.; DAVISON, B.H.; *et al.* Economic analysis of fuel ethanol production from corn starch using fluidized-bed bioreactors. **Bioresource Technology**, v. 75, n. 2, p. 99–105, 2000.
- KWIATKOWSKI, Jason R.; MCALOON, Andrew J.; TAYLOR, Frank; *et al.* Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. **Industrial Crops and Products**, v. 23, n. 3, p. 288–296, 2006.
- LAGUNAS-SOLAR, Manuel C.; MATTHEWS, Stephen M. Radionuclide and electric accelerator sources for food irradiation. **Radiation Physics and Chemistry (1977)**, v. 25, n. 4–6, p. 691–702, 1985.
- LAINETTI, Fabiana de Faria. **Desenvolvimento do projeto arquitetônico de uma unidade móvel de irradiação do IPEN-CNEN/SP para o tratamento de efluentes industriais**. Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- LALLEMAND. Lallemand Biofuels and Distilled Spirits: Data Sheet Thermosacc Dry, Version 2. Milwaukee, Wisconsin. 2020.
- LALUCE, Cecília. Current Aspects of Fuel Ethanol Production in Brazil. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 11, n. 2, p. 149–161, 1991.
- LAM, Eric; CARRER, Helaine; DA SILVA, Jorge A.; *et al.* (Orgs.). **Compendium of Bioenergy Plants: Sugarcane**. 0. ed. [s.l.]: CRC Press, 2016.
- LAPOLLI, Flávio Rubens; HASSEMER, Maria Eliza Nagel; CAMARGO, Jefferson Greyco; *et al.* Desinfecção de efluentes sanitários através de dióxido de cloro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 200–208, 2005.
- LEE, Uisung; KWON, Hoyoung; WU, May; *et al.* Retrospective analysis of the U.S. corn ethanol industry for 2005 – 2019 : implications for greenhouse gas emission reductions. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 5, p. 1318–1331, 2021.
- LEWIS, J. C. The Estimation of Decimal Reduction Times. **Applied Microbiology**, v. 4, n. 4, p. 211–221, 1956.
- LI, Qing; HEIST, E. Patrick; MOE, Luke A. Bacterial Community Structure and Dynamics During Corn-Based Bioethanol Fermentation. **Microbial Ecology**, v. 71, n. 2, p. 409–421, 2016.
- LIMA, Urgel de Almeida; BASSO, Luiz Carlos; AMORIM, Henrique Vianna de. Produção de etanol. In: **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2001. Vol. 3, Cap. 1, p. 1-43.
- LIMA, Roberta B.; DE AGUIAR, Claudio Lima; GALAVERNA, Renan; *et al.* Sucrose and color profiles in sugarcane (*Saccharum sp.*) juice analyzed by UFLC-ELSD and Synapt High-Definition Mass Spectrometry during radiation treatment. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 121, p. 99–105, 2016.

- LINO, Felipe Senne de Oliveira; BAJIC, Djordje; VILA, Jean Celestin Charles; *et al.* Complex yeast–bacteria interactions affect the yield of industrial ethanol fermentation. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1498, 2021.
- LJUNGDAHL, Per O; DAIGNAN-FORNIER, Bertrand. Regulation of Amino Acid, Nucleotide, and Phosphate Metabolism in *Saccharomyces cerevisiae*. **Genetics**, v. 190, n. 3, p. 885–929, 2012.
- LOPES, J. J. C.; PYLE, L. D. **Bioprocess Modelling, Simulation and Control for Ethanol Continuous Production in Brazil**. Revista de Microbiologia, v. 1, p. 14-15, 2005.
- LOPES, Mario Lucio; PAULILLO, Silene Cristina de Lima; GODOY, Alexandre; *et al.* Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 64–76, 2016.
- LOPES, Elaine Martins. *Análise energética e da viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir de sebo bovino*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. 106p.
- LUMPKINS, B.S.; BATAL, A.B.; DALE, N.M. Evaluation of distillers dried grains with solubles as a feed ingredient for broilers. **Poultry Science**, v.83, n.11, p.1891–1896, 2004.
- LUNG, Hsiang-Mei; CHENG, Yu-Chi; CHANG, Yin-Hsuan; *et al.* Microbial decontamination of food by electron beam irradiation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 44, n. 1, p. 66–78, 2015.
- LYONS, T. Pearse Alcohol production: a traditional process changing rapidly. In: JACQUES, Kathryn Ann; LYONS, T. Pearse; KELSALL, D. R. **The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries**. 4th ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2003. p. ix-xi.
- MACEDO, Isaias C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados** (USP Impresso), v. 21, n. 59, p. 157–165, 2007.
- MACEDO, Isaias C.; SEABRA, Joaquim E.A.; SILVA, João E.A.R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582–595, 2008.
- MAKANJUOLA, D.B.; TYMON, Anna; SPRINGHAM, D.G. Some effects of lactic acid bacteria on laboratory-scale yeast fermentations. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 14, n. 5, p. 350–357, 1992.
- MANOCHIO, C.; ANDRADE, B.R.; RODRIGUEZ, R.P.; *et al.* Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 743–755, 2017.
- MAPA [Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento]. Projeções do Agronegócio - Brasil 2020/21 a 2030/31, Projeções de Longo Prazo. Secretaria de Política Agrícola. SIRE/Embrapa, Departamento de Estatística, UNB. Brasília, 2021.
- MARKET RESEARCH Consultoria. **Ethanol Market Reports and Industry Analysis**. 2022. Disponível em: www.marketresearch.com.
- MARQUES, Marcos Omir; MARQUES, Tadeu Alcides; TASSO JUNIOR, Luiz Carlos. Tecnologia do açúcar - Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Funep, UNESP, Jaboticabal. 2001. 166p.
- MARTINS, J.B. A História da Energia Nuclear. Comissão Nacional de Energia Nuclear/CNEN. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <www.cnen.gov.br>.
- MATSUOKA, Sizuo.; BRESSIANI, José. A.; MACCHERONI, Walter.; FOUTO, Ivo. Bioenergia de cana. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool – Tecnologias e Perspectivas**. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 487-517.
- MATSUOKA, Sizuo; KENNEDY, Anthony J.; SANTOS, Eder Gustavo D. dos; *et al.* Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospects. **Advances in Botany**, v. 2014, p. 1–13, 2014.

- MATSUURA, Marília Ieda Da Silveira Folegatti; SCACHETTI, Michelle; CHAGAS, Mateus; *et al.* NOTA TÉCNICA RenovaCalc MD : Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio. 2018.
- MCALOON, A; TAYLOR, F; YEE, W; *et al.* **Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks.** [s.l.: s.n.], 2000.
- MCLAUGHLIN, William L.; BOYD, A.W.; CHADWICK, K.H.; MCDONALD, J.C.; MILLER, A. **Dosimetry for Radiation Processing.** London, Taylor & Francis; 1989.
- MDIC [Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços]. COMEX STAT. **Portal de Estatísticas de Comércio Exterior do Brasil.** 2022. Disponível em: <<https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>.
- MELLO JR., C. A., COSTA, O. R. L.; MACHADO, P. F.; D'ARCE R. D. e MATTOS, W. R. S. Efeito do tratamento a pressão de vapor no bagaço de cana de açúcar sobre a sua degradação in vitro e digestibilidade in vivo. **Livestock Research for Rural Development.** Vol.1, nº1, 1989.
- MELO, Marcelo. **Políticas públicas brasileiras de biocombustíveis: estudo comparativo entre os programas de incentivos à produção, com ênfase em etanol e biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis). Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. IMPACTOS DOS PREÇOS DA GASOLINA E DO ETANOL SOBRE A DEMANDA DE ETANOL NO BRASIL. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 18, n. 1, p. 56–83, 2014.
- MENDES, Tiago Antônio de Oliveira; PINTO, Lucas Martins; MENDES, Débora de Sena Oliveira; *et al.* Aumento na produção de biomassa de levedura em propagador aerado por processo descontínuo e semicontínuo para produção de cachaça. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 16, n. 2, p. 81–89, 2013.
- MENEGHIN, Silvana Perissatto; REIS, Fabricia Cristina; ALMEIDA, Paulo Garcia de; *et al.* Chlorine dioxide against bacteria and yeasts from the alcoholic fermentation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 39, n. 2, 2008.
- MENEGHIN, Maria Cristina; REIS, Vanda Renata; CECCATO-ANTONINI, Sandra Regina. Inhibition of bacteria contaminating alcoholic fermentations by killer yeasts. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 5, p. 1043–1050, 2010.
- MENEZES, João Assis Scavuzzi. Aspectos físicos e químicos do caldo de cana que afetam a capacidade fermentativa das células de levedura. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Ciências Biológicas. Pós-graduação em Ciências Biológicas, 2012. 55p.
- MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; VALENTE, M.S.; XAVIER, C.E.; KULAY, L.A.; DONKE, C.G.; MATSUUR, M.I.S.F.; RAMOS, N.P.; BOECHAT, M.A.; Bonomi, M.A.; Capitani, D.H.D.; Chagas, M.F.; Cavalett, O.; Gouvêia, V.L.R. 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**, v.41, n.1, p. 147-208, 2014.
- MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426–428, 1959.
- MILLER, R. B. **Electronic irradiation of foods: an introduction to the technology.** New York: Springer Science US (Food engineering series). 2005.
- MIZIK, Tamás. Economic Aspects and Sustainability of Ethanol Production—A Systematic Literature Review. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6137, 2021.
- MME [Ministério de Minas e Energia]. RenovaBio, Política Nacional de Biocombustíveis. 2021a. Disponível em <www.gov.br/mme>.

- MME [Ministério de Minas e Energia]. Secretaria de Planejamento e Transição Energética. Fontes Energéticas no Planejamento de Longo Prazo. 2021b.
- MOLINS, Ricardo A. (Org.). **Food irradiation: principles and applications**. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- MOREIRA, Marcelo M. R.; SEABRA, Joaquim E. A.; LYND, Lee R.; *et al.* Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 3, p. 209–216, 2020.
- MUELLER, Steffen. 2008 National dry mill corn ethanol survey. **Biotechnology Letters**, v. 32, n. 9, p. 1261–1264, 2010.
- MURTHY, Ganti S.; JOHNSTON, David B.; RAUSCH, Kent D.; *et al.* Starch hydrolysis modeling: application to fuel ethanol production. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 34, n. 7, p. 879–890, 2011.
- MUTHAIYAN, Arunachalam; LIMAYEM, Alya; RICKE, Steven C. Antimicrobial strategies for limiting bacterial contaminants in fuel bioethanol fermentations. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, n. 3, p. 351–370, 2011.
- NAJAFPOUR, Ghasem D. **Biochemical engineering and biotechnology**. 2. ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2015.
- NARENDRANATH, N. V. Bacterial contamination and control in ethanol production. In: JACQUES, Kathryn Ann; LYONS, T. Pearse; KELSALL, D. R. **The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries**. 4th ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2003. Chap. 20, p. 287-298.
- NARENDRANATH, Neelakantam V.; POWER, Ronan. Relationship between pH and Medium Dissolved Solids in Terms of Growth and Metabolism of Lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during Ethanol Production. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 71, n. 5, p. 2239–2243, 2005.
- NASCIMENTO, Rodrigo Alexandre de Alencar. **A caracterização da lignina de bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor: identificação dos compostos de degradação e reações envolvidas**. 2007. 130 p. Tese (Doutorado em Conversão de Biomassa) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2007.
- NAWAR, Wassef W. Volatiles from food irradiation. **Food Reviews International**, v. 2, n. 1, p. 45–78, 1986.
- NEVES, Marcos F.; MILAN, Patrícia.; VALÉRIO, Flávio R.; MARQUES, Vitor N.; DELSIN, Fábio G.; CAMBAÚVA, Vinícius; MARTINEZ, Leticia F.; MOREIRA, Marcelo M. R.; ARANTES, Sofia; TEIXEIRA, Gabriel O. **Etanol de milho: cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. 1Ed., Ribeirão Preto/SP; UNEM, 2021.
- NOBRE, Thais de Paula. **Viabilidade celular de *Saccharomyces cerevisiae* cultivada em associação com bactérias contaminantes da fermentação alcoólica**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- NOBRE, Thais de Paula; HORII, Jorge; ALCARDE, André Ricardo. Viabilidade celular de *Saccharomyces cerevisiae* cultivada em associação com bactérias contaminantes da fermentação alcoólica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 20–25, 2007.
- NOGUEIRA, Luiz A. Horta. **Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1987. 180 f.
- NOGUEIRA, Luiz A. Horta; COSTA, Jonas Carvalheira. **Opções tecnológicas em energia: uma visão brasileira**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável – FBDS. BNDES, 51p. 2012.
- NOLASCO JUNIOR, Jonas. **Desenvolvimento de processo térmico otimizado para mosto de caldo de cana na fermentação alcoólica**. Dissertação (Mestre em Ciência de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

- NOUAILHETAS, Y.; ALMEIDA, C.E.B.; PESTANA, S. Radiações Ionizantes e a Vida. Comissão Nacional de Energia Nuclear/MCTI. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <www.cnem.gov.br>.
- NOVO, Maria Teresa; BELTRAN, Gemma; ROZÈS, Nicolas; *et al.* Effect of nitrogen limitation and surplus upon trehalose metabolism in wine yeast. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 66, n. 5, p. 560–566, 2005.
- NOVOZYMES. Starch-based ethanol: Liquefaction of starch for fuel ethanol production. 2019.
- OECD/FAO [*Organization for Economic Cooperation and Development; Food and Agricultural Organization*]. Agricultural Outlook 2020-2029. 2020. Disponível em: <<https://www.oecd.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-19991142.htm>>.
- OECD/FAO [*Organization for Economic Cooperation and Development; Food and Agricultural Organization*]. Agricultural Outlook 2021-2030. 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook/2021-2030/en/>>.
- OGATA, Bruna Harumi. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- OH, S.H.; LEE, Y.S.; KIM, J.H.; KIM, J.H.; LEE, J.W.; KIM, M.R.; YOON, H.S.; BYUN, M.W. Effects of pH on non-enzymatic browning reaction during γ -irradiation processing using sugar and sugar-glycine solution. **Food Chemistry**, v.94, n.3, p.420-427, 2006.
- OKUNO, Emico. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 185–200, 2013.
- OLIVA-NETO, Pedro; YOKOYA, Fumio. Evaluation of bacterial contamination in a fed-batch alcoholic fermentation process. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 10, n. 6, p. 697–699, 1994.
- OLIVA-NETO, Pedro; YOKOYA, Fumio. **Effects of nutritional factors on growth of *Lactobacillus fermentum* mixed with *Saccharomyces cerevisiae* in alcoholic fermentation**. Revista de Microbiologia, v.28, p.25-31, 1997.
- OLIVA-NETO, Pedro; FERREIRA, Mirella Amorim; YOKOYA, Fumio. Screening for yeast with antibacterial properties from an ethanol distillery. **Bioresource Technology**, v. 92, n. 1, p. 1–6, 2004.
- OLIVEIRA, A.J.; GALLO, C.R.; ALCARDE, V.E.; GODOY, A.; AMORIM, H.V.; Métodos para o controle microbiológico na produção de álcool e açúcar. Piracicaba: FERMENTEC/FEALQ/ESALQ-USP, 1996. 89p.
- PAES, Maria Cristina Dias. **Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho**. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 75). Sete Lagoas, MG: dezembro, 2006. 6p..
- PALACIO, José Carlos Escobar. **Análise Termoeconômica Integrada das Plantas de Cogeração e Etanol em uma Destilaria Autônoma**. 2010. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- PARKS, Leo W.; ADAMS, Bruce G. Metabolism of Sterols in Yeast. **CRC Critical Reviews in Microbiology**, v. 6, n. 4, p. 301–341, 1978.
- PASSOTH, Volkmar; BLOMQUIST, Johanna; SCHNÜRER, Johan. *Dekkera bruceellensis* and *Lactobacillus vini* Form a Stable Ethanol-Producing Consortium in a Commercial Alcohol Production Process. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 73, n. 13, p. 4354–4356, 2007.
- PECEGE. Custos de Produção de cana-de-açúcar dos produtores independentes: Região Centro-Sul - Safra 2018/2019. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas, 2019.

- PECEGE. SILVA, Haroldo J. T. da. Custo de Produção do etanol de milho no Brasil: Análise e perspectivas. In: **Pecege Projetos** (acesso restrito). 2020.
- PECEGE. ROSA, João. Custos de Produção do Setor Sucoenergético. In: **Pecege Consultoria e Projetos** (acesso restrito). 2022.
- PEREIRA FILHO, Israel Alexandre (Ed.). Dados Sistema de Produção: Cultivo do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo**. Versão Eletrônica. 9ª edição, 2015.
- PEREIRA JUNIOR, Nei, BON, Elba P. D. S.; FERRARA, Maria A. **Tecnologia de Bioprocessos**. Rio de Janeiro: Escola de Química/UFRJ, 2008. 68p.
- PERES. Sérgio. Gás do bagaço de cana: um combustível substituto do gás natural. **Produção térmica e fontes não convencionais**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu/PR. 1999.
- PETTI, Allegra A.; CRUTCHFIELD, Christopher A.; RABINOWITZ, Joshua D.; *et al.* Survival of starving yeast is correlated with oxidative stress response and nonrespiratory mitochondrial function. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 45, 2011.
- PETROVSKA, Blagica; WINKELHAUSEN, Eleonora; KUZMANOVA, Slobodanka. Glycerol production by yeasts under osmotic and sulfite stress. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 8, p. 695–699, 1999.
- PHILLIPS, Glyn O. Radiation Chemistry of Carbohydrates. In: **Advances in Carbohydrate Chemistry**. [s.l.]: Elsevier, v. 16, p. 13–58. 1961.
- PHILLIPS, Glyn O. Effects of ionizing radiations on carbohydrate systems. **Radiation Research Reviews**, v.3, n.4, p.335-351, 1972.
- PIERCE, J. S.; For the Analysis Committee. Institute of Brewing: Analysis committee measurement of yeast viability. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 76, n. 5, p. 442–443, 1970.
- PODADERA, Priscilla. **Estudo das propriedades do açúcar líquido invertido processado com radiação gama e feixe de elétrons**. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN/SP. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- PRATI, Patricia; CAMARGO, Gisele Anne. Características do caldo de cana e sua influência na estabilidade da bebida. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 2, n. 1, p. 37–44, 2008.
- PRATT, Patricia L.; BRYCE, James H.; STEWART, Graham G. The Effects of Osmotic Pressure and Ethanol on Yeast Viability and Morphology. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 109, n. 3, p. 218–228, 2003.
- PRECEDENCE RESEARCH Consultoria. Ethanol Market. 2022. Disponível em: <<https://www.precedenceresearch.com/ethanol-market>>.
- RADOMYSKI, Tomasz; MURANO, Elsa A.; OLSON, Dennis G.; *et al.* Elimination of Pathogens of Significance in Food by Low-dose Irradiation: A Review. **Journal of Food Protection**, v. 57, n. 1, p. 73–86, 1994.
- RASHID, H. O.; ITO, H.; ISHIGAKI, I. Distribution of pathogenic vibrios and other bacteria in imported frozen shrimps and their decontamination by gamma-irradiation. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v. 8, n. 5, p. 494–499, 1992.
- REIS, Vanda R.; BASSI, Ana Paula G.; CERRI, Bianca C.; *et al.* Effects of feedstock and co-culture of *Lactobacillus fermentum* and wild *Saccharomyces cerevisiae* strain during fuel ethanol fermentation by the industrial yeast strain PE-2. **AMB Express**, v. 8, n. 1, p. 23, 2018.

- RELA, Paulo Roberto. **Desenvolvimento de dispositivo de irradiação para tratamento de efluentes industriais com feixe de elétrons**. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEN/SP. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- RFA [*Renewable Fuels Association*]. Disponível em <www.ethanolrfa.org>. 2021
- RFA [*Renewable Fuels Association*]. Annual World Ethanol. 2022. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>.
- RIBEIRO, Fernando José Leite; LOPES, Jéssica J. C.; FERRARI, Silmara E. N.; Complementação de Nitrogênio de Forma Contínua no Processo de Fermentação Alcoólica. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 105, p. 26-30, 1987.
- RÍPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; MOLINA JR., Walter Francisco; RÍPOLI, Marco Lorenzo Cunali. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 677–681, 2000.
- RODRIGUES, Kaio C.S.; SONEGO, Jorge L.S.; CRUZ, Antonio J.G.; *et al.* Modeling and simulation of continuous extractive fermentation with CO₂ stripping for bioethanol production. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 132, p. 77–88, 2018.
- ROGERS, Everett M.; TAKEGAMI, Shiro; YIN, Jing. Lessons learned about technology transfer. **Technovation**, v. 21, n. 4, p. 253–261, 2001.
- ROSE, Anthony Harry; HARRISON, John Stuart. **The yeasts**. 2nd ed. London [etc.]: Academic press, 1993.
- ROSS, Stephen A.; WESTERFIELD, Randolph W.; JAFFE, J.; LAMB, R. Administração Financeira, versão brasileira de *Corporate Finance*. 10 ed. Porto Alegre: AMGH Editora. 2015.
- ROSSEL, Carlos Eduardo Vaz. Qualidade da matéria-prima. Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas. **I Workshop Tecnológico sobre Produção de Etanol**. Sessão 1. Disponível em: <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/workshops.php>>.
- RUSSELL, I. **Understanding yeast fundamentals**. In: JACQUES, Kathryn Ann; LYONS, T. Pearse; KELSALL, D. R. **The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries**. 4th ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2003.
- SALLA, Diones Assis; FURLANETO, Fernanda de Paiva Badiz; CABELLO, Claudio; *et al.* Estudo energético da produção de biocombustível a partir do milho. **Ciência Rural**, v. 40, n. 9, p. 2017–2022, 2010.
- SALVADOR, Pablo Antonio Vasquez. Utilização da Radiação Ionizante na Esterilização de Produtos: Radioesterilização. Disciplina, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/USP. São Paulo, 2019.
- SANTOS, Fernando A.; QUEIRÓZ, José H. de; COLODETTE, Jorge L.; *et al.* Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.
- SAS INSTITUTE. SAS Studio: SAS onDemand for Academics, SAS Institute Inc (www.sas.com). 2021
- SAUNDERS, Lauren P.; BISCHOFF, Kenneth M.; BOWMAN, Michael J.; *et al.* Inhibition of Lactobacillus biofilm growth in fuel ethanol fermentations by Bacillus. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 156–161, 2019.
- SCARPARI, Maximiliano Salles; BEAUCLAIR, Edgar Gomes Ferreira de. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, Marcos G. de A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. 882p.
- SCHAFFER, Gerson. Modelagem matemática para alocação de variedades, épocas de plantio e colheita de cana-de-açúcar. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2016.

- SCHERZ, Heimo. Formation of Deoxycompounds and Malondialdehyde in Irradiated Aqueous Solutions of Carbohydrates and Related Compounds. **Radiation Research**, v. 43, n. 1, p. 12, 1970.
- SCHMIDT, C. F.; NANK, W. K. Radiation sterilization of food.i. Procedures for the evaluation of the radiation resistance of spores of clostridium botulinum in food products. **Journal of Food Science**, v. 25, n. 3, p. 321–327, 1960.
- SCHWARZ, Harold A. Free radicals generated by radiolysis of aqueous solutions. **Journal of Chemical Education**, v. 58, n. 2, p. 101, 1981.
- SCOT [Scot Consultoria]. Mercado de DDG e WDG, por Thayná Drugowick. 2020. Disponível em: <<https://www.scotconsultoria.com.br>>.
- SEO, Seung-Oh; PARK, Sung-Kyun; JUNG, Suk-Chae; *et al.* Anti-Contamination Strategies for Yeast Fermentations. **Microorganisms**, v. 8, n. 2, p. 274, 2020.
- SHARMA, S.C.; JOHARY, P.C. Amino-acid removal during cane juice clarification. *Internacional Sugar Journal*, Wales, ENG, v.86, n.1021, p.7-11, 1984.
- SHIYAN, Peter; MUDRAK, Tatiana; KYRYLENKO, Roman; *et al.* Effect of nitrogen and mineral composition of the high-concentrated wort made from starch-containing raw materials on the cultivation of yeast. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 6, n. 11 (90), p. 72–77, 2017.
- SILVA, Francisco de Assis Santos; AZEVEDO, Carlos Alberto Vieira de. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Assistance. *In: 7th World Congress on Computers in Agriculture Conference Proceedings, 22-24 June 2009, Reno, Nevada*. [s.l.]: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- SILVA, Haroldo J. T. da; SANTOS, Peterson Felipe A.; NOGUEIRA JUNIOR, Enilson. C.; VIAN, Carlos E. de F. Aspectos Técnicos e Econômicos da Produção de Etanol de Milho no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v.29, n.4, 2020.
- SILVA, Joana Diniz Rosa da. Frações nitrogenadas em caldos de diferentes cultivares de cana-de-açúcar. 2011. v, 41 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.
- SILVA JUNIOR, Carlos Antonio; CARVALHO, Laércio Alves. Interações nos atributos físicos do solo relacionados a diferentes métodos de preparo no plantio da cana-de-açúcar. **Revista Alcoolbrás**, v.129, n.1, p. 42-45. São Paulo, 2010.
- SILVA, Nathalia Dias; ALVIM, Mariana Resende; ROSARIO, Carlos Gonzalo Alvarez; *et al.* **Nutrients' Supplementation Impacts On Alcoholic Fermentation of Mixed Wort Containing Corn and Sugarcane**. [s.l.]: In Review, 2022.
- SILVEIRA, Giovanni Módolo. **Curvas de maturação em cana energia**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- SIMÃO, Eduardo de Paula; RESENDE, Álvaro Vilela de; GONTIJO NETO, Miguel Marques; *et al.* Nitrogen fertilization in off-season corn crop in different Brazilian Cerrado environments. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01551, 2020.
- SINGH, Narpinder; SINGH, Jaspreet; KAUR, Lovedeep; *et al.* Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219–231, 2003.
- SKINNER, Kelly A.; LEATHERS, Timothy D. Bacterial contaminants of fuel ethanol production. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 31, n. 9, p. 401–408, 2004.
- SMITH, Charles D. **Palestine and the Arab Israeli conflict**. 3. ed. New York: St. Martin's Press, 1996.

- SOARES, José Roberto. **Desenvolvimento de sistema para seguimento de produto e aquisição de dados do processo de irradiação em irradiadores de grande porte.** Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- SOLOMON, S. Post-harvest deterioration of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 11, n. 2, p. 109–123, 2009.
- SOUZA, Amanda P. de; GRANDIS, Adriana; LEITE, Débora C. C.; *et al.* Sugarcane as a Bioenergy Source: History, Performance, and Perspectives for Second-Generation Bioethanol. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 1, p. 24–35, 2013.
- SOUZA, Leisa. Secretaria de Planejamento e Transição Energética, Ministério de Minas e Energia. **Fontes Energéticas no Planejamento de Longo Prazo: Climate Bonds Initiative.** 2021.
- SRIVASTAVA, Samir K. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 9, n. 1, p. 53–80, 2007.
- STUPIELLO, José Paulo; HORII, Jorge. **Considerações sobre tratamentos de caldo de cana para fermentação alcoólica.** Álcool e Açúcar, vol. 3, n. 1, p. 40-46, 1981.
- SWARBRICK, JAMES (ORG.). **ENCYCLOPEDIA OF PHARMACEUTICAL TECHNOLOGY.** 3RD ED., v.1, PINEHURST, NORTH CAROLINIA, USA. 2007.
- TABILE, Rubens André; TOLEDO, Anderson De; SILVA, Rouverson Pereira da; *et al.* Perdas na colheita de milho em função da rotação do cilindro trilhador e umidade dos grãos. **Scientia Agraria**, v. 9, n. 4, p. 505, 2008.
- TAUHATA, Luiz; SALATI, Ivan P. A.; DI PRINZIO, Renato; DI PRINZIO, Antonieta R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Rio de Janeiro, IRD/CNEN, n.9, 2013. 345p.
- THOMAS, K.C.; HYNES, S.H.; INGLEDEW, W.M. Effect of lactobacilli on yeast growth, viability and batch and semi-continuous alcoholic fermentation of corn mash. **Journal of Applied Microbiology**, v. 90, n. 5, p. 819–828, 2001.
- THOMAS, K. C.; INGLEDEW, W. M. Fuel alcohol production: effects of free amino nitrogen on fermentation of very-high-gravity wheat mashes. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 7, p. 2046–2050, 1990.
- THOMAS, K. C.; HYNES, S. H.; JONES, A. M.; *et al.* Production of fuel alcohol from wheat by VHG technology: Effect of sugar concentration and fermentation temperature. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 43, n. 3, p. 211–226, 1993.
- TIUKOVA, Ievgeniia; EBERHARD, Thomas; PASSOTH, Volkmar. Interaction of *Lactobacillus vini* with the ethanol-producing yeasts *Delekeria bruxellensis* and *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 61, n. 1, p. 40–44, 2014.
- TONOLI, Fernando César. **Adaptação de leveduras para fermentação com alto teor alcoólico.** Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- UNEM [União Nacional do Etanol de Milho]. **Brazil corn ethanol production to jump 86 percent.** Argus média, 2020.
- UNEM [União Nacional do Etanol de Milho]. UNEM projeta alta de 36% na produção de etanol de milho. *Jornal MT Norte.* 2023.
- UNICA [União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia]. **Oferta de cbios deve ficar 15 por cento acima da meta de 2020.** Site oficial, 2020
- UNICA [União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia]. Observatório da cana e bioenergia: acompanhamento de safra. 2021.
- URBAIN, Walter M. **Food irradiation.** Orlando: Academic Press, 1986. 351p.

- USDA [United States Department of Agriculture]. Economic Research Service: **Feed Grains Yearbook**. 2022a.
- USDA [United States Department of Agriculture]. National Agricultural Statistics Service of United States Department of Agriculture. 2022b.
- USGC [*United States Grains Council*]. USGC DDGS User Handbook: **Precision DDGS Nutrition**. 4th edition. U.S. Grains Council, 2019.
- VALSECHI, Octavio. O processo melle-boinot de fermentação na sociedade de usinas de açúcar brasileira, de Piracicaba. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 1, n. 0, p. 139–157, 1944.
- VAN GERWEN, Suzanne J.C.; ROMBOUTS, Frank M.; RIET, Klaas Van't; *et al.* A Data Analysis of the Irradiation Parameter D10 for Bacteria and Spores under Various Conditions. **Journal of Food Protection**, v. 62, n. 9, p. 1024–1032, 1999.
- VAJDA, O.; GAL, I. **Microbiological study of irradiated sugar**. *Elelmiszervizsgalati Koezlemlenyek*, v.16, n.3, p.129-135, 1970.
- VENTURA, R. Desenvolvimento de técnicas e avaliações de antimicrobianos visando a produção de etanol carburante. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química Araraquara, 2015. 120p.
- VILLEN, Rafael Almud; BORZANI, Walter; NETTO, Antonio Sacco. Influence of the accumulation of phosphate and magnesium ions in the yeast cells on the ethanol productivity in batch ethanol fermentation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 1, p. 153–155, 2009.
- ZELLER, A.L.V.; OLIVEIRA, A.J.; ZAGO, E.A. Conservação de xarope de cana-de-açúcar pelo emprego da radiação gama. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.2, n.4, p.29-36, 1984.
- WALKER, Graeme M. **Yeast physiology and biotechnology**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- WALKER, Graeme M.; WALKER, Roy S.K. Enhancing Yeast Alcoholic Fermentations. *In: Advances in Applied Microbiology*. [s.l.]: Elsevier, 2018, v. 105, p. 87–129.
- WANG, Michael; HAN, Jeongwoo; DUNN, Jennifer B; *et al.* Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 045905, 2012.
- WANG, Michael; WU, May; HUO, Hong. Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. **Environmental Research Letters**, v. 2, n. 2, p. 024001, 2007.
- WATANABE, H.; SATO, T. Changes in content and composition of sugar in molasses caused by gamma irradiation. **Journal of Fermentation Technology**, v.58, p.363-366, 1980.
- WAYMAN, Morris; PAREKH, Sarad R. **Biotechnology of biomass conversion: fuels and chemicals from renewable resources**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1990. (The Biotechnology series).
- WHEALS, Alan E.; BASSO, Luiz C.; ALVES, Denise M. G.; *et al.* Fuel ethanol after 25 years. **Trends in Biotechnology**, v. 17, n. 12, p. 482–487, 1999.
- WHO [*World Health Organization*]. WORLD HEALTH ORGANIZATION (Org.). **Safety and nutritional adequacy of irradiated food**. Geneva: World Health Organization, 1994.
- WHO [*World Health Organization*]. WORLD HEALTH ORGANIZATION (Org.). **Wholesomeness of irradiated food: report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee [on the Wholesomeness of Irradiated Food ; Geneva, 27 October - 3 November 1980]**. Geneva: World Health Organization, Food and Agricultural Organization, International Atomic Energy Agency, 1981. (Technical report series / World Health Organization, 659).

- WHO [*World Health Organization*]. WORLD HEALTH ORGANIZATION (Org.). **La Comestibilidad de los alimentos irradiados: informe de un Comité Mixto FAO-OIEA-OMS de expertos : Ginebra, 31 de agosto - 7 de septiembre de 1976**. Roma: FAO : OMS, 1977.
- WOOD, Jennifer L.; TANG, Caixian; FRANKS, Ashley E. Competitive Traits Are More Important than Stress-Tolerance Traits in a Cadmium-Contaminated Rhizosphere: A Role for Trait Theory in Microbial Ecology. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 121, 2018.
- WYMAN, Charles E.; HINMAN, Norman D. Ethanol: Fundamentals of production from renewable feedstocks and use as a transportation fuel. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 24–25, n. 1, p. 735–753, 1990.
- WYMAN, Charles E.; SPINDLER, Diane D.; GROHMANN, Karel. Simultaneous saccharification and fermentation of several lignocellulosic feedstocks to fuel ethanol. **Biomass and Bioenergy**, v. 3, n. 5, p. 301–307, 1992.
- YOKOYA, Fumio. Microbiologia de Processo. In: EGUCHI S.Y.; YOKOYA, F.; CANHOS V.P.; GALLO, C.R. **Pontos críticos microbiológicos em usinas de açúcar e álcool** Campinas: Fundação Tropical de Pesquisas Tecnológicas “André Tosello”, 1989. p.1-22.
- YOKOYA, Fumio; OLIVA NETO, Pedro. Características da floculação de leveduras por *Lactobacillus fermentum*. **Revista de Microbiologia**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 12-16, 1991.
- YOKOYA, Fumio. Fabricação da aguardente de cana: série fermentações industriais n. 2. Campinas: **Fundação Tropical de Pesquisa e Tecnologia** “André Tosello”, 1995. 92p.
- YUE, Guojun; YU, Jianliang; ZHANG, Xu; *et al.* The influence of nitrogen sources on ethanol production by yeast from concentrated sweet sorghum juice. **Biomass and Bioenergy**, v. 39, p. 48–52, 2012.
- ZAGO, E.A.; SILVA, L.F.L.F.; BERNADINO, C.D.; AMORIM, H.V. **Métodos analíticos para o controle da produção de álcool e açúcar**. 2 ed. Piracicaba: FERMENTEC/FEALQ/ESALQ/USP, 1996. 194p.
- ZAMORA, Fernando. Biochemistry of Alcoholic Fermentation. In: MORENO-ARRIBAS, M. Victoria; POLO, M. Carmen (Orgs.). **Wine Chemistry and Biochemistry**. New York, NY: Springer New York, 2009, p. 3–26.
- ZHENG, Jinshui; WITTOUCK, Stijn; SALVETTI, Elisa; *et al.* A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 70, n. 4, p. 2782–2858, 2020.
- ZHU, Chuanhe; CHEN, Zhao; YU, Guoyong. Fungicidal mechanism of chlorine dioxide on *Saccharomyces cerevisiae*. **Annals of Microbiology**, v. 63, n. 2, p. 495–502, 2013.