

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**SORGO SACARINO COMO SUBSTRATO PARA A PRODUÇÃO DE
ETANOL E MODELAGEM DA CINÉTICA DE FERMENTAÇÃO**

Júlio Henrique Zanata

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a **Alice Medeiros de Lima**

São Carlos – SP

2023

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 29 de agosto de 2023 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Alice Medeiros de Lima, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

Convidado: Prof. Dr. Antônio José Gonçalves da Cruz, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ruy de Sousa Júnior, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por sempre me inspirar e motivar a dar o melhor de mim. Aos meus pais sou grato pelo presente da Vida e pelo suporte incondicional que me permitiu chegar até este momento.

Aos amigos que me fizeram companhia ao longo dessa jornada, trazendo momentos de descontração e me ajudando a superar os desafios diários e as preocupações. Um agradecimento especial à M.^a Vitória, por estar sempre perto e me fazer acreditar no meu potencial, e aos senhores Agariel, João “Natureza”, Herson, Victor, Carlos e André, por quem guardo grande afeição.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Química, pelos ensinamentos transmitidos com zelo por cada professor.

À minha orientadora, Prof.^a Alice M. de Lima, pela confiança e por dispor de seu tempo e energia me auxiliando a aperfeiçoar este trabalho.

Ao Prof. Felipe F. Furlan, com quem tive a oportunidade de aprender mais sobre a utilização de ferramentas de programação para a modelagem de processos fermentativos.

À Prof.^a Gabriela C. Lopes, por me orientar na iniciação científica e alimentar o meu tenro interesse por simulações, abrindo novos caminhos para mim.

À Universidade Federal de São Carlos e funcionários, por toda a estrutura e apoio oferecidos.

*Todo saber é v3o, se n3o houver trabalho,
e este 3 vazio se n3o houver Amor.*

(Celso Charuri)

RESUMO

O sorgo é uma gramínea com cultivo expressivo em diversos países e de grande importância agrícola e pecuária, principalmente devido à inclusão de seu grão na nutrição animal, sendo o quinto cereal mais produzido no mundo. Pode-se obter um caldo rico em açúcares fermentescíveis dos colmos da variedade sacarina do sorgo, que foi objeto de diversas pesquisas visando-a como fonte alternativa para a produção de álcool combustível e para reduzir o período de ociosidade das usinas de cana-de-açúcar na entressafra. Diferente da cana, matéria-prima tradicional no Brasil, a cultura do sorgo não se limita ao clima tropical, se adapta a diferentes tipos de solo e resiste melhor à estiagem. Nos EUA, onde a produção de etanol a partir de cereais já é bem estruturada, os grãos de sorgo são vastamente utilizados para este fim, podendo ser processados junto aos grãos de milho. Na última década, surgiram as primeiras usinas de etanol de milho em território brasileiro, abrindo possibilidades para o grão de sorgo e, por consequência, contribuindo na descentralização da indústria sucroalcooleira. Este trabalho final de graduação buscou expor o panorama e perspectivas da produção industrial de etanol a partir do sorgo no Brasil e, a partir de ensaios fermentativos da literatura, foi realizada a modelagem matemática dos perfis de concentração de células, substrato e produto ao longo do processo, tendo os grãos e o caldo de sorgo sacarino como fontes de açúcares. Com o apoio da linguagem de programação Python, foram resolvidos os balanços de massa, com a cinética de crescimento celular baseada no modelo de Monod. Os parâmetros ajustados geraram perfis simulados com boa aproximação aos dados experimentais. Também foi possível estimar um rendimento total em etanol de 6.192 L/ha/colheita, o que torna interessante o uso desta matéria-prima, levando em consideração suas demais características.

Palavras-chave: Etanol; sorgo; fermentação; cinética; modelagem.

ABSTRACT

Sorghum is a grass with significant cultivation in several countries and of great agricultural and livestock importance, mainly due to the inclusion of its grain in animal nutrition, being the fifth most produced cereal in the world. A broth rich in fermentable sugars can be obtained from the culms of the saccharin variety of sorghum, which has been the subject of several studies aiming at it as an alternative source to produce fuel alcohol and to reduce the idle period of sugarcane mills in the off-season. Unlike sugarcane, a traditional raw material in Brazil, the cultivation of sorghum is not limited to the tropical climate, it adapts to different types of soil and is better resistant to drought. In the USA, where the production of ethanol from cereals is already well structured, sorghum grains are widely used for this purpose, where they can be processed with corn grains. In the last decade, the first corn ethanol plants appeared in Brazil, opening possibilities for sorghum grain and, consequently, contributing to the decentralization of sugar and alcohol industry. This final paper sought to expose the panorama and perspectives of the industrial production of ethanol from sorghum in Brazil and, with data from fermentative tests in the literature, the mathematical modeling of the concentration profiles of cells, substrate and product was carried out throughout the process, having sweet sorghum grains and juice as sources of sugars. With the support of the Python programming language, mass balances were solved, with cell growth kinetics based on the Monod model. The adjusted parameters generated simulated profiles with good approximation to the experimental data. It was also possible to estimate a total ethanol yield of 6,192 L/ha/harvest, which makes the use of this raw material interesting, considering its other characteristics.

Keywords: Ethanol; sorghum; fermentation; kinetics; modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Evolução do volume de etanol produzido pelos cinco principais estados brasileiros nas últimas doze safras.	4
Figura 2.2.	Diagrama de blocos do processo geral para a produção de etanol a partir de colmos açucarados.	11
Figura 2.3.	Diagrama de blocos do processo geral para a produção de etanol a partir de grãos e moagem a seco.	14
Figura 2.4.	Reação de hidrólise da sacarose pela enzima invertase.	17
Figura 2.5.	Curva padrão de crescimento de levedura.	19
Figura 4.1.	Cenário A - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ($V_R = 0,8$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).	28
Figura 4.2.	Cenário B - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ($V_R = 0,8$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).	28
Figura 4.3.	Cenário C - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ($V_R = 2$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).	29
Figura 4.4.	Cenário D - Variação das concentrações de células, substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo por <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ($V_R = 2$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).	29
Figura 4.5.	Concentrações experimentais <i>versus</i> simuladas de substrato (C_S) e de etanol (C_E) dos cenários modelados.	31

LISTA DE TABELAS E QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Caracterização química dos grãos, caldo e bagaço do sorgo sacarino.	7
Tabela 2.2.	Rendimento em biomassa e etanol de diferentes culturas.	10
Tabela 4.1.	Visão geral de cada cenário modelado, com valores de produtividade (Q_E) e rendimento ($Y_{E/S}$) em etanol e eficiência da fermentação (η_E).	27
Tabela 4.2.	Parâmetros cinéticos estimados para os cenários selecionados segundo o modelo de crescimento celular de Monod.	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1.	Biorrefinarias de cereais a serem inauguradas no Brasil.	9
Quadro 3.1.	Parâmetros e condições iniciais da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo.	23
Quadro 3.2.	Parâmetros e condições iniciais da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo.	25
Quadro 4.1.	Rendimento de biomassa e produção de etanol a partir das frações sacarínea e amilácea do sorgo sacarino.	33

NOMENCLATURA

C_S	Concentração de substrato no meio de fermentação	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
C_X	Concentração de células no meio de fermentação	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
C_P	Concentração de produto no meio de fermentação	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
K_S	Constante de limitação do substrato	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Q_E	Produtividade em etanol	$\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$
t_f	Tempo total de fermentação	h
V_R	Volume reacional	L
$Y_{X/S}$	Conversão de células por unidade de substrato	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
$Y_{X/E}$	Conversão de células por unidade de etanol	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
$Y_{X/G}$	Conversão de células por unidade de glicerol	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Símbolos gregos

μ	Velocidade específica de crescimento	h^{-1}
μ_{max}	Velocidade específica de crescimento máxima	h^{-1}
η_E	Eficiência da conversão de substrato em etanol por fermentação	%

Abreviações

ART	Açúcares redutores totais
DDG	Distillers dried grains
DDGS	Distillers dried grains with solubles
SAF	Sustainable aviation fuel

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Panorama da produção de etanol no Brasil	3
2.2. Sorgo	5
2.2.1. Produção de etanol a partir das diferentes frações do sorgo.....	11
2.2.1.1. Fração sacarínea.....	11
2.2.1.2. Fração amilácea	13
2.2.1.3. Fração lignocelulósica	15
2.3. Fermentação alcoólica	16
2.4. Considerações finais	19
3. METODOLOGIA	21
3.1. Simulação da produção de etanol a partir da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo	21
3.1.1. Modelo cinético	21
3.1.1.1. Modelo da taxa de crescimento celular.....	21
3.1.1.2. Modelo de consumo de substrato.....	22
3.1.1.3. Modelo de produção de etanol e de glicerol	22
3.1.1.4. Parâmetros	23
3.1.2. Simulação	24
3.2. Simulação da produção de etanol a partir da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo	24
3.3.1. Parâmetros	24
3.3.2. Simulação	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

A busca pela menor dependência por petróleo no setor de transporte impulsionou aprimoramentos no sentido de diversificar o combustível utilizado pelos veículos. Em 2003, foi iniciada no Brasil a produção comercial do primeiro automóvel com motor *flex*, capaz de operar com qualquer mistura de gasolina e etanol. Em 2022, o país produziu mais de 1,6 milhões de veículos *flex*, número muito superior ao de carros movidos a diesel, gasolina ou elétricos (ANFAVEA, 2022). Assim, nesses últimos 20 anos, o setor sucroalcooleiro teve o seu crescimento garantido pela constante demanda pelo produto nos postos de abastecimento.

Dentre as matérias-primas utilizadas para a produção de etanol no Brasil, há perspectivas de que o sorgo passe a ganhar mais espaço, ao lado da cana-de-açúcar e do milho. Sua área de cultivo está em expansão para além do eixo formado pelos estados de Goiás, Minas Gerais e norte de São Paulo, sendo que mais de 4 milhões de toneladas de grão de sorgo foram colhidas na safra 2022/23 (CONAB, 2023). Este grão está entre os cinco cereais mais produzidos no mundo e é utilizado principalmente na alimentação animal, enquanto países da Ásia e da África subsaariana, exploram o seu uso na alimentação humana (MUTEGI *et al.*, 2010; NETO, 2023). Por apresentar amido em sua composição, no entanto, o grão de sorgo é uma fonte de açúcares em potencial para servir de substrato à fermentação alcoólica na indústria dos biocombustíveis. Países como os Estados Unidos utilizam uma parcela significativa da safra de sorgo nas plantas de etanol, visto que o grão apresenta rendimento similar a outros cereais, como o milho, enquanto requer menor consumo de água de irrigação (VIANA, 2022; KUBECKA, 2011).

Além de ser resistente a períodos de seca, a cultura do sorgo não se limita ao clima tropical, como a cana-de-açúcar. A variedade sacarina do sorgo, inclusive, se assemelha à cana por apresentar um caule rico em açúcares redutores (glicose, frutose e sacarose), o que desperta o interesse para o seu aproveitamento nas usinas brasileiras de cana como fonte renovável complementar (ROSSELL, 2011; MENEZES, 2021). Visto que o cultivo da cana-de-açúcar é comprometido em determinadas épocas do ano e o material colhido não pode ser estocado, as plantas industriais reduzem o processamento de biomassa, o que resulta na menor oferta e encarecimento do etanol (UDOP, 2022). O cultivo do sorgo sacarino poderia ser feito nas lavouras no período de entressafra da cana-de-açúcar, permitindo o prolongamento das operações nas usinas e a menor variação da oferta interna de etanol.

Com os avanços tecnológicos voltados para a produção do etanol de segunda geração, o bagaço residual obtido da moagem do caule de sorgo sacarino também poderia servir de substrato para a indústria de biocombustíveis. O aproveitamento deste material, composto por celulose e hemicelulose, já foi objeto de pesquisas e experimentos, gerando resultados promissores (GODIN *et al.*, 2010; BARCELOS, 2012; SARROUH *et al.*, 2014).

A produção de etanol a partir de uma matéria-prima adicional como o sorgo contribuiria para a descentralização da indústria sucroalcooleira no Brasil, visto que pode ser cultivado em regiões com condições edafoclimáticas não favoráveis para a cana-de-açúcar. Pode-se destacar que existem projetos de biorrefinarias de etanol de cereais nos estados do Rio Grande do Sul e Bahia, cujas operações têm início previsto para a partir do ano de 2024 (BSBIOS, 2022; DÔRR, 2022). Além do etanol, o processamento dos grãos gera um subproduto rico em fibras e proteínas, que pode compor a nutrição de animais para a indústria da carne (NICHOLS e BOTHAST, 2008).

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo expor os avanços mais recentes da produção industrial de etanol a partir do sorgo sacarino e, a partir de dados experimentais da literatura, realizar a modelagem matemática do processo fermentativo, tendo os grãos e o caldo de sorgo como fontes de açúcares. Por fim, buscou-se avaliar o rendimento em produto desta matéria-prima e outras características que tornam interessante a sua cultura para as usinas de etanol.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma síntese dos principais tópicos relacionados à produção de etanol no Brasil, bem como as perspectivas para este setor com o aproveitamento de outras matérias-primas renováveis, além da tradicional cana-de-açúcar. O sorgo é apresentado como uma fonte alternativa emergente no cenário brasileiro, com a promessa da inauguração de biorrefinarias de etanol de cereais a partir do ano de 2024, após anos de aprimoramento sobre o cultivo da gramínea e de investigações sobre o seu potencial como um todo. Abordou-se o processo de conversão das diferentes frações do sorgo em substrato para produção de etanol, assim como o processo fermentativo e seus principais parâmetros de controle.

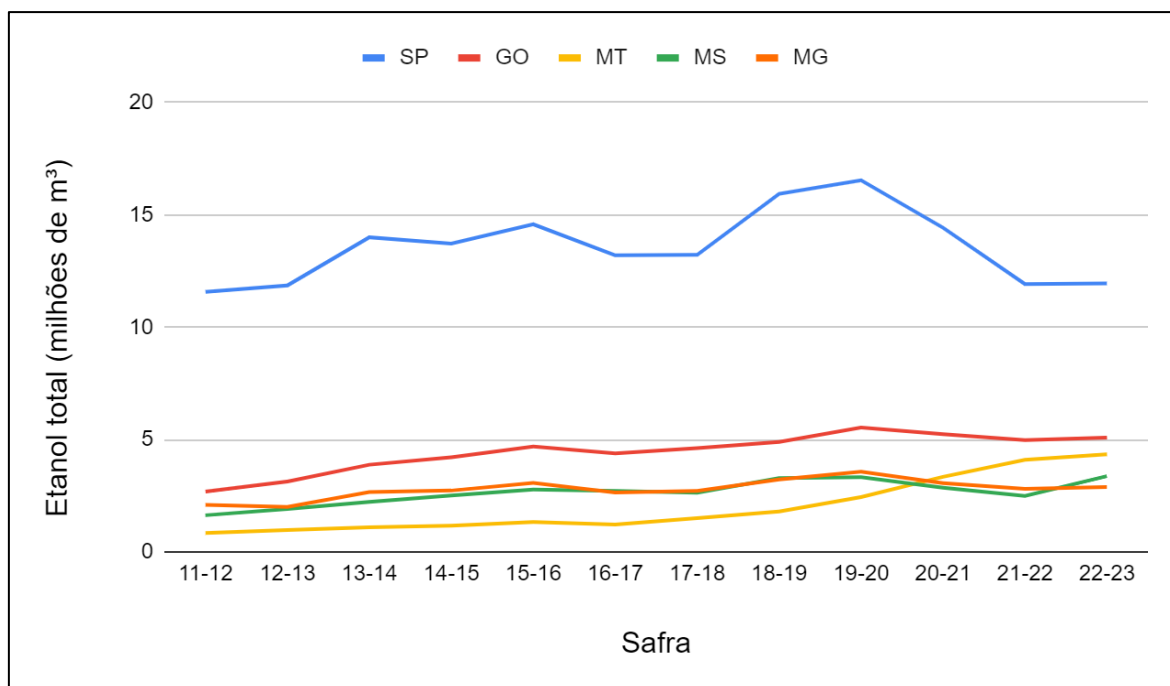
2.1. Panorama da produção de etanol no Brasil

O mercado dos biocombustíveis no Brasil passou por uma fase de crescimento progressivo nos anos 2000, período no qual o consumo interno de etanol hidratado mais do que dobrou, com a introdução dos veículos flex. Desde então, a produção total de álcool oscila em torno do valor médio de 28 bilhões de litros por ano, volume superado apenas pelos EUA. Juntos, os dois países são responsáveis por mais de 80% da produção de etanol no globo (OBSERVATÓRIO DA CANA, 2023; RFA, 2022). Os principais fatores que direcionam a manutenção desse mercado mundialmente são a busca pela menor dependência por fontes fósseis de energia, ao mesmo tempo em que a descarbonização da cadeia produtiva do setor de combustíveis segue alinhada às ações de desenvolvimento sustentável pautadas em acordos internacionais (vide Agenda 30 da ONU, de 2015). No Brasil, o etanol é a grande aposta como centro da transição energética para além do segmento tradicional dos veículos leves, com empresas já investindo na modernização das usinas para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) e de metanol verde para o transporte marítimo (MACHADO, 2022).

Dos 2,7 bilhões de litros de etanol exportados pelo Brasil no período de 2022/2023, 88% foram provenientes do estado de São Paulo, representante de mais de um terço da produção nacional. Uma década atrás, o estado dominava praticamente metade do mercado brasileiro. Hoje, ainda mantém sua posição de maior produtor, mas acompanhado de estados com capacidade produtiva em ascensão, com destaque para a região Centro-Oeste, que produziu 40% do etanol da safra mais recente (OBSERVATÓRIO DA CANA, 2023). A

Figura 2.1 apresenta a evolução do volume de etanol fabricado pelos cinco estados com maior produção nacional.

Figura 2.1. Evolução do volume de etanol produzido pelos cinco principais estados brasileiros nas últimas doze safras.



Fonte: Adaptado de Observatório da Cana (2023).

A vasta maioria do etanol brasileiro tem como matéria-prima a cana-de-açúcar, uma cultura de tradição secular e adequada a regiões de clima tropical e subtropical. Além do caldo obtido da moagem de seu caule, que é convertido em açúcar e álcool comerciais, os subprodutos desta indústria são largamente explorados para geração de valor: a vinhaça que deixa os destiladores tem aplicação como fertilizante; enquanto o bagaço da cana moída serve de combustível para as caldeiras, gerando energia para as usinas (MACHADO e ABREU, 2006; GRIPPA, 2012). Por outro lado, o cultivo da cana-de-açúcar está longe de ser homogêneo no Brasil: sua extensão territorial abrange regiões com condições ambientais diversas, sendo que a espécie vegetal em questão apresenta inúmeras exigências para ser cultivada de forma rentável, como faixa ideal de temperatura e suprimento adequado de água. Por consequência, e somado ao fato de que a cana colhida deve ser processada o mais breve possível, a implantação de usinas que utilizam esta matéria-prima pode ser inviável em alguns estados brasileiros, os quais dependem da importação de etanol para suprir a demanda interna pelo produto.

A produção de etanol a partir de outras matérias-primas pode contribuir para a descentralização dessa indústria no Brasil. O milho vem ocupando uma posição de destaque como alternativa à cana-de-açúcar, sendo responsável por 15% da produção de etanol na safra 22/23, em contraste com a participação de 6% até 2020. Atualmente, há oito usinas full milho em operação no país (sete delas no Mato Grosso), e mais dez usinas flex, que utilizam os grãos de milho quando há menor disponibilidade da cana-de-açúcar (OBSERVATÓRIO DA CANA, 2023). Apesar de a cana-de-açúcar produzir cerca de 6.500 litros de etanol por hectare e o rendimento em etanol do milho comumente ser inferior a metade desse valor, o cultivo deste último é possibilitado em pelo menos uma lavoura adicional na mesma área e em uma mesma safra (SPONCHIADO *et al.*, 2017). Além disso, os grãos apresentam o diferencial de poderem ser estocados por mais de 2 anos, o que não é possível com a cana. Assim, o local de instalação dessas usinas é menos dependente da posse ou arrendamento de terras e do investimento em estruturas agrícolas. Quanto às destilarias autônomas (modelo full milho), grande parte dos custos vêm da compra de biomassa para geração de energia (estímulo à produção de eucalipto, bambu etc.). Também é requisitado um investimento adicional para a produção paralela de ração animal de alto valor proteico, o DDG, mas que é compensado na forma de capital pela venda do produto (PIRACICABA ENGENHARIA, 2019).

Uma alternativa ainda pouco explorada no Brasil é o sorgo como fonte de açúcares para a fermentação alcoólica. Os grãos de sorgo se aproximam aos do milho no desempenho em produção de etanol, tornando o vegetal um bom candidato para complementar o volume utilizado de milho, em especial nas janelas de maior risco, nas quais este último apresenta baixas produtividades ou fica suscetível ao enfezamento (PETROLI, 2023).

Na próxima seção serão exploradas as possibilidades trazidas com a inserção do sorgo na cadeia produtiva dos biocombustíveis.

2.2. Sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma gramínea tropical nativa do continente africano, de regiões que hoje correspondem ao Sudão e à Etiópia (MUTEGI *et al.*, 2010). O sorgo é amplamente cultivado para a produção de grãos destinados à alimentação humana e animal, sendo o cereal mais importante das zonas áridas devido à sua tolerância a longos períodos de seca. Os grãos também são explorados na produção de farinha para panificação e amido industrial e a palhada é utilizada como forragem. A variedade denominada por sorgo

sacarino é caracterizada por um caule com alto teor de açúcares, tornando-a adequada para a produção de etanol, além de poder compor silagem para animais (NETO, 2023).

No Brasil, programas de desenvolvimento de cultivares do sorgo se iniciaram em meados da década de 1970. No contexto da crise do petróleo de 1973 e da criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) em 1975, o sorgo sacarino foi introduzido como alternativa à produção de etanol durante a entressafra da cana-de-açúcar (MENEZES, 2021). Apesar do grande crescimento da produção de sorgo na década seguinte, principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, a variedade sacarina não teve êxito, visto que não havia híbridos adequados às peculiaridades do plantio regional brasileiro, além de estudos da época demonstrarem que a energia gasta para produzir etanol utilizando a cana era menor, principalmente devido à biomassa de seu bagaço, em comparação ao do sorgo sacarino (SARROUH *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 1978). Em 2008, a Embrapa Milho e Sorgo reiniciou seu programa de desenvolvimento de cultivares de sorgo sacarino e, hoje, ele vem conquistando espaço na diversificação da matriz energética, graças às tecnologias de melhoramento genético, além do incentivo de políticas públicas e da demanda por matéria-prima alternativa.

De acordo com dados do nono levantamento de safra pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Brasil alcançou uma produção de aproximadamente 4,3 milhões de toneladas de grão de sorgo no ciclo 2022/23. Um aumento de 38,7% em relação à temporada passada, acompanhado de um aumento da área de cultivo em 20,9%. A atual produção de sorgo tem maior destaque no eixo formado por Goiás, Minas Gerais e norte de São Paulo, com 1,2 milhão de hectares. No entanto, são consideráveis os esforços recentes pela sua expansão em regiões do Nordeste (Matopiba e Sealba) e nos estados do Mato Grosso, Rondônia e Pará, onde, além de produção local de sementes, há desenvolvimento de híbridos de alto potencial produtivo para as indústrias da carne e do etanol. Para esta última aplicação, um polo de produção de álcool a partir de milho e sorgo iniciado na Bahia coloca a região de Luís Eduardo Magalhães em cena (DÔRR, 2022), enquanto o cultivo de sorgo no Mato Grosso tem a oportunidade de acompanhar o crescimento da produção de etanol no estado e a implantação de novas usinas. Diferente do Brasil, onde a cultura do sorgo como complemento na produção de etanol é uma realidade recente e em escala limitada, cerca de 12% da safra nos EUA já é utilizada para fabricar biocombustíveis (VIANA, 2022).

Com os devidos processos industriais, a cultura do sorgo é adequada a diferentes tipos de produção de etanol, visto que mais de uma fração da planta pode ser aproveitada como substrato para os microrganismos fermentadores: seus grãos, ricos em amido (fração

amilácea); o suco açucarado extraído de seus colmos (fração sacarínea); e o bagaço residual (fração lignocelulósica). A Tabela 2.1 mostra a composição do sorgo sacarino obtida por pesquisas no Brasil. É importante notar que muitas cultivares de sorgo sacarino superam os 3 metros de altura e podem apresentar excesso de grãos em seu ápice, características que favorecem o acamamento da planta e a consequente perda da qualidade da matéria-prima, devido ao maior teor de impurezas na colheita (MAY *et al.*, 2012).

Tabela 2.1. Caracterização química dos grãos, caldo e bagaço do sorgo sacarino.

Grãos (% base seca)		Caldo (% base úmida)		Bagaço (% base seca)	
Amido	79,1	Sacarose	8,5 – 12,4	Celulose	21,3
Umidade	14	Glicose	2,1	Hemicelulose	11,6
Proteínas	10,1	Frutose	1,2	Lignina	10,3
Lipídeos	3,4	Amido	0,5	Cinzas	0,6
Fibras	1,4	Ácido aconítico	0,25	Extrativos	42
Cinzas	1,2	Água	84	Outros	14,2

Fonte: Barcelos (2012), Rossell (2011).

Experimentos com 25 cultivares de sorgo sacarino conduzidos em duas épocas de cultivo em uma fazenda do norte de Minas Gerais mostraram uma variação do teor de sólidos solúveis totais do caldo de 8,7° Brix¹, no verão, até 21,7° Brix, no outono, com uma média geral de 16° Brix (SOUZA *et al.*, 2011). A partir de um projeto de pesquisa com proposta similar, os cultivares plantados em um terreno no Mato Grosso obtiveram o valor médio de 15,13° Brix (PEREIRA *et al.*, 2022). Assim, o sorgo sacarino se assemelha à cana-de-açúcar no sentido de o caule ser o principal componente de armazenamento dos açúcares solúveis, apesar de seu caldo possuir relativamente mais glicose e menos sacarose e teor de amido de até 0,5%. Na entressafra da cana, que dura cerca de 5 meses, as terras podem ser aproveitadas para o cultivo do sorgo e os seus colmos processados na mesma instalação destinada à produção de etanol de cana-de-açúcar. Como o sorgo amadurece mais rapidamente do que a cana (ciclo vegetativo de 120 a 130 dias) e alcança um nível ótimo de açúcar em diferentes períodos do ano, as indústrias de etanol são capazes de prosseguir com a extração de açúcar e estender a temporada de operação por até 60 dias ou mais, reduzindo o período de ociosidade (SARROUH *et al.*, 2014; MENEZES, 2021).

¹ 1° Brix = 1 g de açúcar por 100 g de solução.

Sendo composto majoritariamente por açúcares fermentescíveis, o caldo de sorgo poderia ser convertido diretamente na fermentação. Na prática, no entanto, as máquinas colhedoras de cana não são capazes de separar totalmente os grãos dos colmos no momento da colheita, alterando as condições de fermentação devido à variação do teor de amido no caldo. Portanto, é extremamente necessário conhecer o potencial do sorgo sacarino na produção de etanol para que ele seja adotado como matéria-prima auxiliar na entressafra da cana, dispondo-se da mesma infraestrutura (MAY *et al.*, 2012). A partir de 2011, a Raízen, maior companhia sucroalcooleira do Brasil, passou a cultivar o sorgo sacarino de forma experimental, para avaliação de sua performance na fabricação de etanol nas unidades que utilizam a cana-de-açúcar. Motivada pelos resultados obtidos durante as últimas safras, foi anunciado um acordo de produção do sorgo em escala comercial em 2015, com sementes oriundas da empresa Ceres (SIQUEIRA, 2015).

O grão de sorgo pode ser usado para produção de etanol em usinas que já utilizam o milho, cereal mais comumente aplicado para este fim. O processo de conversão do amido em etanol é semelhante para todos os grãos: o amido é convertido em monômeros de glicose com o uso de enzimas, gerando o substrato necessário para a fermentação e produção de etanol e gás carbônico. No caso de moagem a seco dos grãos, seus demais componentes, como proteínas e fibras, participam de todas as etapas industriais até a destilação, na qual constituem o produto de fundo dos componentes não fermentados, a vinhaça. Após a retirada do excesso de água dessa vinhaça, o subproduto resultante pode ser misturado ao DDG e comercializado para alimentação animal (NICHOLS e BOTHAST, 2008). Em relação ao rendimento de etanol, o grão de sorgo produz a mesma quantidade por área que outros cereais, mas usa um terço a menos de água no crescimento da planta (KUBECKA, 2011; VIANA, 2022).

No Brasil, não há dados concretos de que o grão de sorgo seja aproveitado em processos fermentativos atualmente, sendo apenas discutida a possibilidade de complementar a produção nas usinas de etanol de milho (PETROLI, 2023). No entanto, existem pelo menos dois projetos que prometem fazer utilização do sorgo entre outros cereais para este fim a partir do ano de 2024, como mostra o Quadro 2.1, expandindo essa indústria para novos estados. A Be8 (antiga BSBios), empresa de energias renováveis do Rio Grande do Sul, prevê um investimento total de R\$ 556 milhões para que a unidade produtora de etanol e farelos funcione com toda a capacidade instalada, garantindo um retorno anual de R\$ 1,3 bilhão, além da geração de centenas de novos empregos (BSBIOS, 2022). Na Bahia, a brasileira Impacto Energia contará com equipamentos e tecnologia de conversão de

cereais fornecidos pela norte-americana ICM, líder mundial nesse quesito. Além dos volumes de etanol e DDGS descritos no Quadro 2.1, esta unidade poderá fabricar até 9 mil toneladas de óleo vegetal por ano a partir da moagem a seco de milho e sorgo (DÔRR, 2022).

Quadro 2.1. Biorrefinarias de cereais a serem inauguradas no Brasil.

Grupos envolvidos	Impacto Energia, ICM	Be8	
Localização	Luís Eduardo Magalhães / BA	Passo Fundo / RS	
Matérias-primas	Milho e sorgo	Milho, trigo, sorgo e outros	
Inauguração	2025	2024 (1ª fase)	2027 (2ª fase)
Moagem (ton/dia)	1700	750	1500
Etanol (mil m ³ /ano)	260	111	220
DDGS (mil ton/ano)	185	-	155

Fonte: Dôrr (2022), BSBios (2022).

Sponchiado *et al.* (2017) sugerem que o sorgo granífero seria a variedade ideal para complementar a produção de etanol de milho, por produzir melhor farelo para a nutrição animal em comparação ao sorgo sacarino. Este dado vai de acordo com a informação de que a atual detentora da maior capacidade produtiva de etanol nos EUA, a empresa POET, já cultivou o sorgo granífero para servir de matéria-prima em seus processos (GOVERNORS' BIOFUELS COALITION, 2013). No Brasil, a Embrapa desenvolve cultivares do sorgo granífero que apresentaram rendimento de 6.000 kg de grãos por hectare, com custo de produção inferior ao do milho (SPONCHIADO *et al.*, 2017).

A tecnologia dos combustíveis de segunda geração traz uma possibilidade adicional para incrementar a produção de etanol utilizando o bagaço de sorgo, como já é feito com a cana-de-açúcar no Brasil. Para isso, a biomassa deve passar por etapas de pré-tratamento e de hidrólise, para a quebra das moléculas de celulose e hemicelulose em açúcares fermentescíveis. Um pré-tratamento de deslignificação do bagaço é determinante para “soltar” essas moléculas umas das outras e, assim, aumentar a eficiência do processo hidrolítico. Nesse sentido, a fração lignocelulósica de outras variedades de sorgo (o forrageiro e o biomassa) se destacam pelos seus níveis de lignina bem menores em comparação a outras fontes de fibra lenhosas e não lenhosas (GODIN *et al.* 2010; SIMEONE *et al.*, 2018). Devido à hemicelulose, os hidrolisados da fibra do sorgo são soluções ricas em pentoses (xilose e arabinose), além das hexoses representadas pelas moléculas de glicose. A

fermentação direta das pentoses a etanol é uma barreira tecnológica aos poucos sendo superada, visto que poucos microrganismos a realizam, além do meio exigir alta osmotolerância (SARROUH *et al.*, 2014).

De forma a sintetizar o potencial do sorgo na produção de etanol frente a outras culturas, a Tabela 2.2 apresenta a produtividade e o rendimento em etanol das diferentes frações da cana-de-açúcar, milho e sorgo.

Tabela 2.2. Rendimento em biomassa e etanol de diferentes culturas.

	Biomassa (ton/ha)	Etanol (L/ton)	Etanol (L/ha)
Cana-de-açúcar (colmos)	77	80 – 100	6.190 – 7.500
Cana-de-açúcar (bagaço)	25	254 – 680	6.300 – 6.800
Sorgo (grão)	2,5 – 5,0	450 – 480	775 – 1.850
Sorgo (caldo)	35 – 75	76 – 80	3.050 – 7.620
Sorgo (bagaço)	30	304 – 430	9.120 – 12.900
Milho (grão)	3,6 – 6,1	388 – 700	2.500 – 4.020
Milho (palha)	-	-	1.050 – 1.400

Fonte: Conab (2023), Sponchiado *et al.* (2017), Klink (apud Barcelos, 2012), Vasilakogloua *et al.* (2011), Mussatto *et al.* (2010), Szulczyk *et al.* (2010), Souza *et al.* (2005), Cruz *et al.* (2004).

Considerando o aproveitamento de uma safra por completo, Barcelos (2012) estimou experimentalmente a geração de 160 L de etanol por tonelada de sorgo sacarino, o que corresponde a 13600 L de etanol/ha/safra (79,1% do rendimento teórico). Comparado ao rendimento em etanol do caldo da cana-de-açúcar da Tabela 2.2, aquele equivale a quase o dobro deste, reforçando como o sorgo pode ser uma alternativa promissora. O sorgo tem adaptação a uma maior variedade de condições edafoclimáticas e apresenta ciclo de crescimento mais curto, de até 130 dias, ao mesmo tempo em que a eficiência energética do seu bagaço para a cogeração é similar à do bagaço de cana, estando ambos na faixa de 2 mil kcal.kg⁻¹.

Os custos da cadeia logística das matérias-primas ocupam uma grande parcela no custo total da produção de etanol. Portanto, se o máximo do sorgo sacarino pudesse ser efetivamente utilizado nessa indústria, o custo total de fabricação do etanol de sorgo sacarino seria reduzido através do compartilhamento do custo co-logístico (HESS *et al.*, 2007).

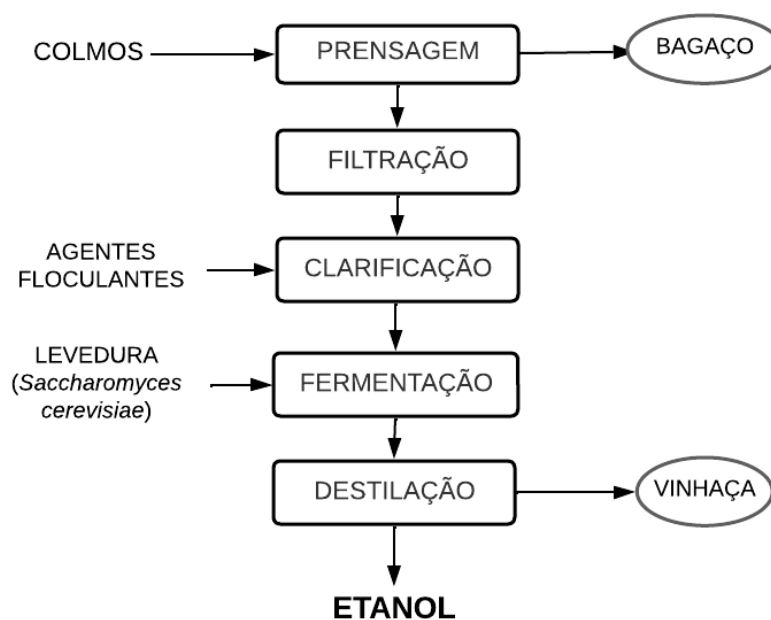
2.2.1. Produção de etanol a partir das diferentes frações do sorgo

Este tópico abordará os processos industriais mais utilizados para a produção de etanol a partir de diferentes classes de matérias-primas. Independente do material utilizado, a via fermentativa é o método aplicado na maior parte dos países, sendo constituído do preparo do substrato, fermentação e remoção do excesso de água e de impurezas do etanol. O preparo do substrato para obtenção dos açúcares fermentescíveis é o que mais diferencia um processo de outro, como será observado. A mistura líquida contendo os açúcares é chamada de mosto. Na fermentação, microrganismos produzem etanol e gás carbônico a partir do mosto e, na destilação, o etanol é concentrado até os graus exigidos para comercialização.

2.2.1.1. Fração sacarínea

As fontes açucaradas, ou sacaríneas, são ricas em monossacarídeos e dissacarídeos, como os colmos da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino. A Figura 2.2 apresenta o fluxo principal para a produção de etanol a partir de colmos açucarados.

Figura 2.2. Diagrama de blocos do processo geral para a produção de etanol a partir de colmos açucarados.



Fonte: Acervo pessoal.

Para a produção de etanol a partir desses materiais, é necessária uma etapa de extração do caldo dos colmos, feita pela prensagem em rolos de moendas, e sua posterior filtração em

peneiras vibratórias, que removem os sólidos mais grosseiros ainda presentes. A seguir, esse caldo é decantado, ou clarificado, pela remoção de impurezas floculadas a partir de um tratamento químico. O aquecimento a temperaturas acima de 105 °C eleva a eficiência desse processo, além de auxiliar na redução de contaminantes microbianos. Após o ajuste de temperatura, pH e concentração de açúcares (por diluição em água), o caldo clarificado pode seguir para a etapa de fermentação (MACHADO e ABREU, 2006; GRIPPA, 2012).

Na fermentação, os açúcares extraídos são convertidos em etanol por meio da ação de microrganismos, geralmente *Saccharomyces cerevisiae*, espécie conhecida como levedura de panificação. Nas usinas de cana-de-açúcar, esse processo dura de 8 a 12 horas. O vinho fermentado obtido nos tanques fermentadores é centrifugado para recuperação das leveduras, que recebem um tratamento com ácido sulfúrico para serem reutilizadas. A outra parte do vinho, majoritariamente líquida, é então enviada a uma dorna volante, que possibilita a alimentação contínua das colunas de destilação. Após uma sequência de destilações, a solução contendo etanol diluído em água (7 a 10% em volume) deixa o processo na forma de álcool hidratado (96 °GL) ou álcool anidro (até 99,7 °GL), produtos que devem ser estocados em tanques para comercialização (GRIPPA, 2012).

Em relação aos subprodutos principais gerados no processo descrito, temos primeiro o bagaço, parte fibrosa dos colmos que sobra após a prensagem destes. Esse material de baixa umidade é conduzido por esteiras para ser queimado em uma caldeira. O calor da queima produz vapor d'água para movimentar turbinas, que acionam os geradores de energia elétrica para a usina. É comum a geração excedente de eletricidade, a qual pode ser ofertada às redes elétricas regionais (GRIPPA, 2012).

Como produto de fundo da primeira coluna de destilação, obtém-se uma vinhaça com baixíssimo teor de etanol e que usualmente é aproveitada nas lavouras como fertilizante, visto a sua grande concentração em potássio. Cabe colocar que a cada litro de etanol produzido, podem ser gerados mais de 10 L de vinhaça, a qual não pode ser simplesmente descartada na natureza por ser rica em matéria orgânica e, assim, um poluente em potencial. Uma outra prática possível é a queima desse efluente, o que permite recuperar sais de interesse agrícola, além de gerar energia (MACHADO e ABREU, 2006; CANAONLINE, 2014).

Por fim, deve-se lembrar que toda a estrutura de produção de etanol costuma ser instalada anexa à uma planta de produção de açúcar, ambas utilizando a mesma matéria-prima. Isso dá à indústria a chance de priorizar mais uma rota ou outra de produção em determinada época, de acordo com os preços de mercado. No processamento dos colmos, a

obtenção do caldo clarificado é o ponto no qual pode existir a separação das correntes, para a rota do açúcar ou do etanol. No caso de ser utilizado para a produção de açúcar, o caldo é concentrado em evaporadores para formar um xarope, composto 40% por água. Desse xarope são obtidos os cristais de açúcar, após etapas de cozimento, cristalização, centrifugação e secagem em tambores rotativos. Esse produto está pronto para ser comercializado como açúcar cristal ou pode ser utilizado para a fabricação de açúcar refinado, por exemplo (GRIPPA, 2012).

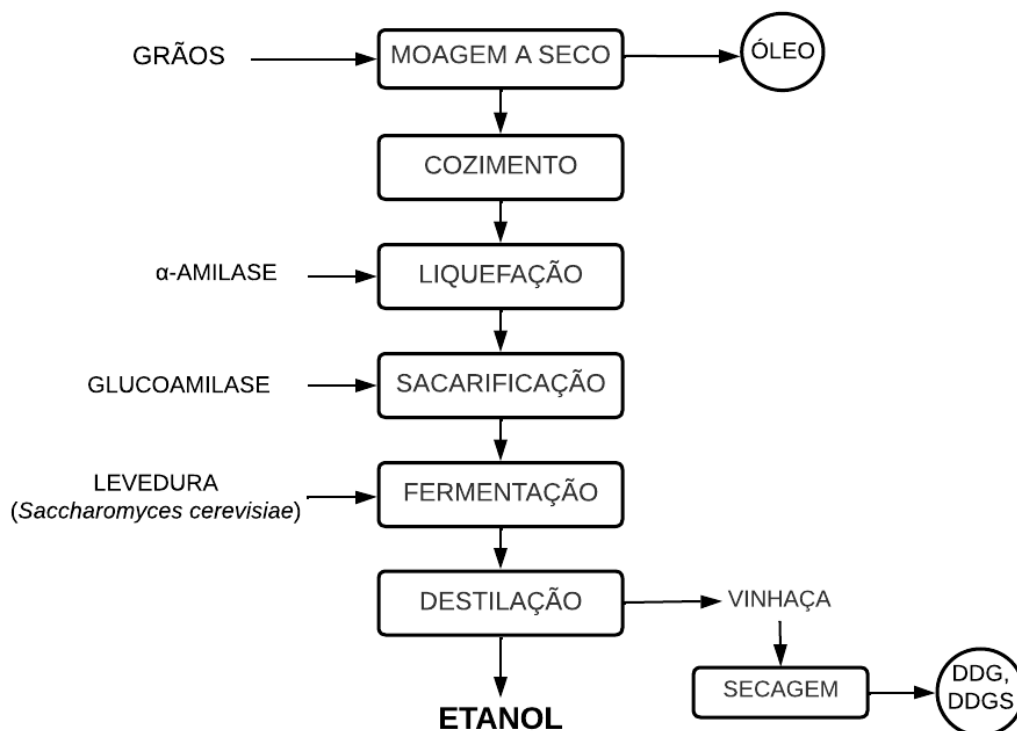
2.2.1.2. Fração amilácea

A categoria de materiais amiláceos abrange os grãos, raízes e tubérculos, sendo que os grãos precisam de uma moagem inicial para expor o amido e favorecer a ação das enzimas (MACHADO e ABREU, 2006). Dois métodos podem ser empregados para a produção de etanol de grãos: a moagem úmida e a moagem a seco. No primeiro, as várias frações do cereal são separadas para a melhor recuperação de subprodutos, como licor de maceração, óleo do germen, fibras e glúten, o que resulta em um amido mais puro. Já no segundo, não ocorre esse pré-fracionamento, tendo como subprodutos possíveis o óleo extraído da moagem e a vinhaça da destilação, que pode compor o DDG, ou DDGS, após o devido tratamento. A produção de etanol a partir de grãos pequenos tende a ser realizada pelo processo de moagem a seco (NICHOLS e BOTHAST, 2008; FERNANDES; 2019).

Em 2006, 82% do etanol de usinas de milho dos EUA foi produzido por moagem a seco (NICHOLS e BOTHAST, 2008). No Brasil, os grandes custos da produção de etanol por via úmida direcionam à maior preferência pela moagem a seco também (FERNANDES; 2019). Assim, o foco neste tópico será voltado ao referido processo. A Figura 2.3 apresenta o processo geral para a produção de etanol a partir de grãos.

Nas usinas em que o milho e o sorgo são processados, os grãos podem passar juntos pela moagem, visto que apresentam rendimentos próximos em etanol (DAHLBERG, 2007, apud NICHOLS e BOTHAST, 2008). As partículas de cereais devem então ser cozidas, para a diluição e gelatinização do amido, que ocorre usualmente na faixa de temperatura de 60 a 70 °C. Nas indústrias, esse cozimento costuma ser feito com vapor, sob pressão e em regime contínuo, utilizando um equipamento do tipo *jet cooker* (TAYLOR *et al.*, 2006; MACHADO e ABREU, 2006; FERNANDES; 2019).

Figura 2.3. Diagrama de blocos do processo geral para a produção de etanol a partir de grãos e moagem a seco.



Fonte: Acervo pessoal.

A gelatinização do amido facilita a sua posterior hidrólise, convertendo-o em açúcares fermentescíveis. Bothast e Schlicher (2004) descrevem que tal processo se dá primeiro pela adição da enzima comercial α -amilase, hidrolisando parcialmente o amido em dextrinas e reduzindo a viscosidade da solução (etapa de liquefação). Em seguida, com o resfriamento da solução e ajuste de pH para 4,5, as dextrinas são hidrolisadas em glicose e maltose pela enzima glucoamilase adicionada (etapa de sacarificação), resultando em uma solução que pode ser chamada de hidrolisado enzimático.

Uma possibilidade explorada no método de moagem a seco dos cereais é a adição das leveduras fermentadoras ao mesmo tempo que a glucoamilase, levando à sacarificação e fermentação simultâneas. Essa prática, além de promover maiores rendimentos em etanol, contribui para limitar o crescimento de bactérias contaminantes e reduzir a osmolaridade, visto que mantém baixa a concentração de moléculas livres de glicose, convertidas na fermentação tão rapidamente quanto são liberadas pela ação da glucoamilase (NICHOLS e BOTHAST, 2008). No caso da fermentação realizada após sacarificação, pode ser necessário adicionar água ao mosto para ajuste da concentração de substrato.

Dependendo das condições, é comum a fermentação do milho durar de 2 até 3 dias (BOTHAST e SCHLICHER, 2004), com a solução final encaminhada a um tanque volante antes da destilação. O vinho que entra na primeira coluna de destilação pode conter de 30 a 35% de sólidos em base seca, o que exige um tipo de equipamento adequado e diferente do utilizado nas usinas de cana. Assim, os pratos perfurados das colunas dão lugar aos pratos do tipo *disc-and-donut*, por exemplo (GRIPPA, 2012). O produto de fundo é centrifugado e enviado a secadores para se obter os destilados secos de grãos (DDG), que podem ser comercializados como suplemento proteico para diferentes criações de animais.

São necessários silos para estocagem do DDG, além dos tanques de armazenamento para o etanol hidratado e o anidro.

2.2.1.3. Fração lignocelulósica

Os materiais lignocelulósicos apresentam em sua composição celulose e hemicelulose, longas cadeias de moléculas de açúcares, além de lignina, que prove suporte estrutural. São encontrados frequentemente como resíduos da indústria madeireira e agrícola, na forma de palhas e folhas, além do bagaço gerado na prensagem dos colmos para extração de seu caldo em usinas sucroalcooleiras. Dada a sua alta disponibilidade, estes materiais são de grande interesse como matérias-primas para a produção de etanol de segunda geração, sendo a biomassa lignocelulósica considerada uma das principais fontes de açúcares do futuro (MUSSATTO *et al.*, 2010).

O processamento desses materiais para fermentação alcoólica se inicia com um pré-tratamento físico que os reduza a partículas menores (trituração ou pirólise), de modo a aumentar a digestibilidade da biomassa. Um pré-tratamento químico, normalmente por hidrólise com ácido sulfúrico diluído, é aplicado para separar do material fibroso a fração hemicelulósica, que inclui pentoses como a xilose e a arabinose, além de glicose. Após a exposição ao ácido à temperatura superior a 100 °C, a separação das frações líquida (hidrolisado hemicelulósico) e sólida (celulignina ácida) pode ser feita por prensagem. Com o ajuste do pH, por adição de hidróxido de cálcio, e filtração, para remover o precipitado formado, a fração líquida está praticamente pronta para ser utilizada como substrato de fermentação (BUORO, 2021; BARCELOS, 2012).

A fração sólida contém o polissacarídeo celulose, devendo passar por etapas adicionais para a sua sacarificação. Essas etapas podem ser resumidas em: Lavagem para remoção do excesso de ácido; secagem; tratamento alcalino (exposição à hidróxido de sódio para

remoção da lignina) e hidrólise enzimática (BARCELOS, 2012). Este último processo é a quebra da celulose em açúcares simples (glicose) pela ação de enzimas, usualmente na faixa de 40 a 50 °C e pH de 4 a 5 (OLSSON *et al.*, 1996). Grande parte do encarecimento da produção do etanol de segunda geração é devido ao custo das diversas enzimas utilizadas, essenciais para rompimento da estrutura heterogênea da cadeia celulósica (PITARELO, 2007; LYND, 2008; BUORO, 2021).

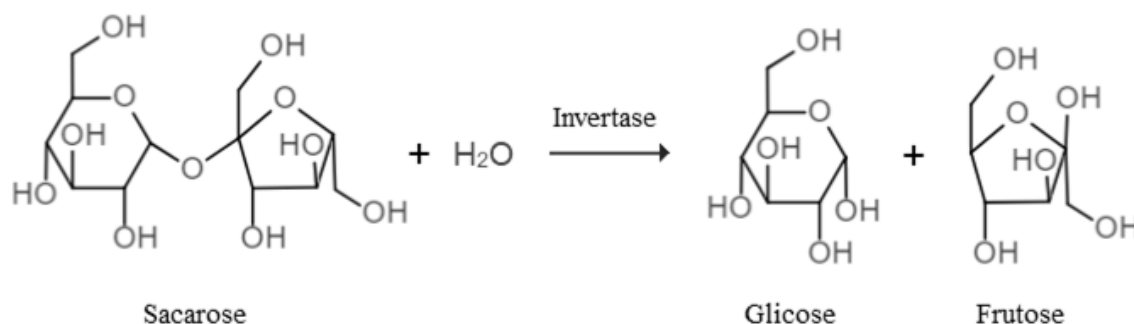
Com os açúcares simples extraídos, o processo segue de forma usual, com as etapas de fermentação e posteriores destilações. No caso do substrato contendo pentoses, a fermentação depende do cultivo de microrganismos específicos capazes de metabolizar tais moléculas, diferente da *Saccharomyces cerevisiae* comum. Estudos de engenharia genética levaram ao desenvolvimento de uma levedura modificada para possuir essa capacidade, utilizando genes de outros fungos e bactérias (FENG *et al.*, 2018). Em ensaios fermentativos de bancada com hidrolisado hemicelulósico, conduzidos por Barcelos (2012), utilizou-se uma linhagem da levedura *Scheffersomyces stipitis*, considerada uma forte candidata para a bioconversão de pentoses em etanol (FARIAS *et al.*, 2014).

2.3. Fermentação alcoólica

A fermentação alcoólica é o processo exotérmico de conversão de açúcares fermentescíveis a etanol e dióxido de carbono por microrganismos, na ausência de oxigênio. Esta transformação bioquímica está diretamente relacionada com diversos setores industriais, com destaque para o sucroalcooleiro, no qual geralmente se utilizam células de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* para compor um inóculo que, adicionado à uma solução açucarada, realiza o processo fermentativo (LIMA *et al.*, 2001).

Como as leveduras só podem produzir etanol a partir de monossacarídeos, uma etapa deve preceder a fermentação em si quando o meio é rico em sacarose, dissacarídeo presente tanto no caldo da cana-de-açúcar como do sorgo sacarino. Muitos dos microrganismos fermentadores produzem a enzima invertase, responsável pela “quebra” da molécula de sacarose em glicose e frutose (LOPES e BORGES, 2009), como mostrado na Figura 2.4. Nota-se que, para cada mol de sacarose, são formados dois mols de hexoses, açúcares simples e fermentescíveis que podem ser agrupados sob a classificação de açúcares redutores totais (ART).

Figura 2.4. Reação de hidrólise da sacarose pela enzima invertase.



Fonte: Adaptado de Marzzoco e Torres (1999)

Após uma série de reações que ocorrem no citoplasma das leveduras, sob condições anaeróbias, as hexoses ($C_6H_{12}O_6$) absorvidas são convertidas em etanol (C_2H_5OH) e gás carbônico (CO_2) liberados para o meio (LOPES e BORGES, 2009), como sintetizado pela Equação 2.1.



Na prática, a levedura utiliza parte dos açúcares para a produção de glicerol e álcoois superiores, necessários para a manutenção celular. Assim, o rendimento em etanol da fermentação não alcança o valor teórico, que equivale a 0,511 g etanol/g glicose. Na fermentação alcoólica, a concentração final de glicerol varia entre 5 e 11 $g.L^{-1}$ (LUYTEN *et al.*, 1995, apud BARCELOS, 2012), enquanto o etanol pode alcançar concentrações máximas de até 95 $g.L^{-1}$, equivalente a 12 % em volume (DOMBEK e INGRAM, 1986, apud BARCELOS, 2012). Vale adicionar que a produção de células é pequena quando comparada com a quantidade de etanol produzido nessas condições (BARRE *et al.*, 2000, apud BARCELOS, 2012). O dióxido de carbono liberado durante a fermentação pode ser capturado e comercializado para uso na carbonatação de bebidas ou produção de gelo seco, por exemplo (BOTHAST e SCHLICHER, 2004).

Sabe-se que as células de levedura são sensíveis a altas concentrações de etanol, o que constitui um dos principais fatores limitantes do processo. Segundo Holzberg *et al.* (1967), tal efeito inibitório já é identificado a partir da concentração de 26 $g.L^{-1}$, havendo inibição completa do crescimento celular para além de 70 $g.L^{-1}$. Acredita-se que o etanol acumulado no meio se torna um fator de estresse para as células ao alterar sua camada lipídica, levando à diminuição do transporte de glicose e à redução da atividade metabólica (FERNANDES,

2008). Para se controlar o impacto da inibição pelo etanol, além do tempo do processo, limita-se a concentração de açúcares no mosto alimentado às dornas em cerca de 180 g.L^{-1} de ART (MAIORELLA *et al.*, 1983; AMORIM *et al.*, 2011). Concentrações excessivas de açúcares também podem reduzir a eficiência do processo, ao acarretar no estresse osmótico, assimilação incompleta do substrato e formação de produtos indesejáveis (VASCONCELOS, 2015).

Dependendo do substrato utilizado, a correção de sua acidez é realizada antes da inoculação, para que o pH se encontre na faixa ótima de 4,0 a 5,0 (MENEZES, 1980, apud CAFFER, 2015). Nesse intervalo, a atividade da enzima invertase é máxima, favorecendo a fermentação alcoólica e minimizando a formação de subprodutos indesejados, como o ácido acético. Além disso o meio ácido previne o crescimento de bactérias contaminantes (RIBEIRO, 2010, apud CAFFER, 2015).

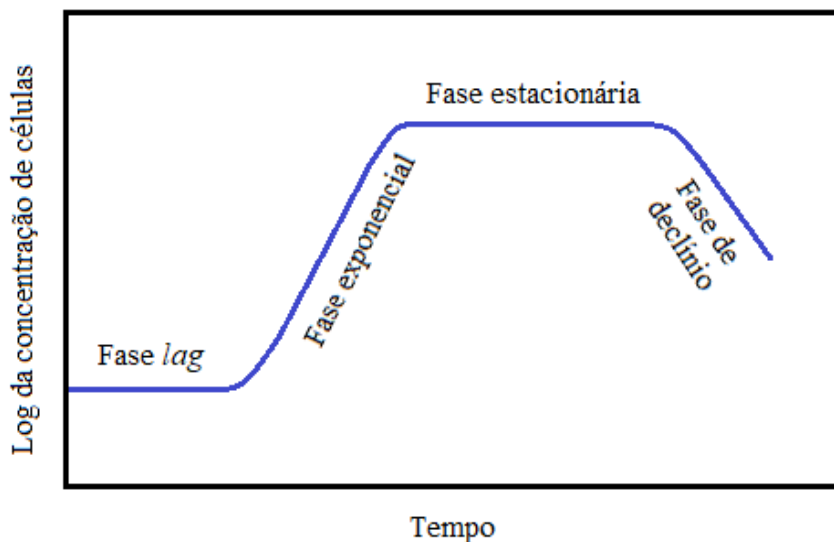
Devido à liberação de calor, é necessário resfriar continuamente o meio durante a fermentação anaeróbia, de modo a manter a temperatura interna dos biorreatores dentro da faixa ótima de 26 a 35 °C. A partir deste limite máximo, a viabilidade celular já é afetada, pois há aumento do transporte de substâncias tóxicas para o interior da célula. Temperaturas ainda maiores resultam na morte celular (LIMA *et al.*, 2001; FERNANDES, 2008).

Nas destilarias brasileiras costuma-se usar o sistema descontínuo ou de batelada alimentada, no qual os tanques são esvaziados e eventualmente higienizados ao fim de cada fermentação. Já no sistema contínuo, alimenta-se o biorreator com um fluxo contínuo de substrato e retira-se dele o vinho, que é centrifugado e então encaminhado para a destilação. Este último apresenta menor custo de instalação, mas a assepsia dos equipamentos não pode ser feita com frequência, o que pode levar a menores níveis de produtividade devido a contaminações. Em contraste, o sistema descontínuo facilita, além da assepsia, a medição e o controle de variáveis, aspectos importantes do processo (GODOY *et al.*, 2011).

O conhecimento da cinética da fermentação alcoólica é essencial para a modelagem do processo, o dimensionamento de equipamentos e o entendimento de como os fatores mencionados acima influenciam na formação de produtos e demais parâmetros de qualidade. A produção de etanol pelas leveduras *Saccharomyces cerevisiae* está diretamente associada ao crescimento celular, o que leva à vasta utilização da taxa de reprodução das células, μ , como parâmetro em modelos matemáticos do processo fermentativo. Quando introduzidos em um meio que apresente as condições necessárias para o desenvolvimento celular, os microrganismos mostram quatro principais fases de crescimento: a fase *lag*; a fase de crescimento acelerado (ou exponencial); a fase estacionária e a fase de declínio ou morte

(BLACK, 2002). A Figura 2.5 ilustra a variação do logaritmo da concentração de células ao longo do tempo, com cada uma das fases evidenciada.

Figura 2.5. Curva padrão de crescimento de levedura.



Fonte: Acervo pessoal.

O consumo dos açúcares presentes no mosto começa na fase exponencial do crescimento, iniciando pelos açúcares simples (glicose e frutose) e, depois, partindo para o consumo de demais açúcares, como a maltose no caso de o substrato advir de um cereal (BARCELOS, 2012). Em um meio de cultura isolado, à medida que os microrganismos crescem, ocorre o esgotamento dos nutrientes e o acúmulo de resíduos metabólicos, tornando o espaço limitado e o oxigênio menos disponível. Isso leva à menor capacidade de geração de energia pelas células e a consequente redução da taxa de crescimento. Na fase estacionária, a maioria dos açúcares já foi consumida e o número de células vivas permanece constante, pois novas células são produzidas com a mesma velocidade que as células antigas morrem (BLACK, 2002). As fermentações alcoólicas em escala industrial e modo de operação descontínuo costumam ser interrompidas no tempo de esgotamento do substrato no mosto, quando as leveduras também atingiram a fase estacionária de crescimento.

2.4. Considerações finais

Em um cenário de busca por diversificação da matriz energética, e emprego do sorgo na fabricação de etanol não apenas se mostra viável, como é uma realidade cada vez mais palpável no Brasil, com a perspectiva de usinas de milho complementarem a sua produção

com a utilização dos grãos de sorgo. É uma gramínea com maior resistência ao estresse hídrico e bem adaptada a diferentes solos e climas.

A variedade sacarina do sorgo, de caule com alto teor de açúcares simples, tem o potencial de aumentar a produtividade das usinas de etanol de cana-de-açúcar na entressafra, reduzindo o período de ociosidade e melhor aproveitando a capacidade instalada das plantas industriais. Com a produção e oferta linear de álcool combustível no mercado, garante-se o abastecimento, atenuando as grandes oscilações de preços.

3. METODOLOGIA

3.1. Simulação da produção de etanol a partir da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo

As simulações do processo fermentativo foram realizadas no Google Colaboratory², ferramenta livre que permite executar códigos na linguagem Python. O modelo cinético é apresentado a seguir, bem como os parâmetros e condições iniciais usadas. A totalidade dos dados experimentais, para os quais efetuou-se o ajuste do modelo, são originais de Barcelos (2012), que fez o estudo da fermentação das diferentes frações do sorgo sacarino. Dentre as frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica, foram selecionados ensaios fermentativos utilizando apenas as duas primeiras.

3.1.1. Modelo cinético

A elaboração do modelo dinâmico não-linear de cinética das reações metabólicas da levedura *S. cerevisiae* foi baseado nas seguintes premissas:

- 1) Crescimento do microrganismo representado sob condições de substrato limitado, sem qualquer tipo de inibição levado em conta;
- 2) Meio reacional considerado homogêneo;
- 3) Formação de produtos associada ao crescimento celular;
- 4) Balanço de massa realizado no interior do reator, no qual não há correntes de entrada ou saída.

3.1.1.1. Modelo da taxa de crescimento celular

A Equação 3.1 descreve o balanço mássico das células de *Saccharomyces cerevisiae* no processo.

$$\frac{dC_X}{dt} = \mu \cdot C_X \quad (3.1)$$

onde,

μ : taxa específica de crescimento celular, h⁻¹;

² Disponível em: <https://research.google.com/colaboratory/>

C_X : concentração celular no tempo t , g.L⁻¹.

Como não foram consideradas possíveis fontes de inibição celular, a relação entre a taxa específica de crescimento e a concentração de substrato no meio foi representada pela equação de Monod (Equação 3.2).

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{C_S}{C_S + K_S} \quad (3.2)$$

onde,

μ_{max} : máxima taxa específica de crescimento celular, h⁻¹;

C_S : concentração de substrato no tempo t , g.L⁻¹;

K_S : constante de limitação do substrato, g.L⁻¹.

3.1.1.2. Modelo de consumo de substrato

A Equação 3.3 contém o balanço mássico de substrato em termos de hexoses (açúcares fermentescíveis), que são degradadas para a formação de etanol.

$$\frac{dC_S}{dt} = -\mu \cdot C_X \cdot \frac{1}{Y_{X/S}} \quad (3.3)$$

onde,

$Y_{X/S}$: fator de rendimento de geração de células por unidade de substrato consumida.

Assim, a Equação 3.3 relaciona a taxa de crescimento celular à taxa de degradação do substrato.

3.1.1.3. Modelo de produção de etanol e de glicerol

Por fim, a Equação 3.4 expressa a taxa de formação de cada produto. Além do etanol, o glicerol é um subproduto da rota metabólica associada ao crescimento celular do *S. cerevisiae*, podendo também ser modelado e posto em comparação com os dados experimentais disponíveis. Posteriormente, o índice P , para produto, será substituído por E , para etanol, ou G , para glicerol.

$$\frac{dC_P}{dt} = \mu \cdot C_X \cdot \frac{1}{Y_{X/P}} \quad (3.4)$$

onde,

C_P : concentração de etanol ou glicerol no tempo t , g.L⁻¹;

$Y_{X/P}$: fator de rendimento de geração de células por unidade de etanol ou glicerol produzido.

3.1.1.4. Parâmetros

O Quadro 3.1 contém os valores das condições iniciais, tempo de fermentação e os rendimentos de dois ensaios de fermentação utilizando os açúcares do caldo de sorgo como substrato para a levedura. Para o modelo de Modelo, é necessário estimar μ_{max} e K_S .

Quadro 3.1. Parâmetros e condições iniciais da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo.

Parâmetro	Cenário A*	Cenário B**
$C_{S,0}$ (g/L)	161,97	181,18
$C_{X,0}$ (g/L)	8	12
t_f (h)	11,25	8,0
$Y_{X/S}$	0,056	0,080
$Y_{X/E}$	0,127	0,197
$Y_{X/G}$	1,425	3,255

* Referente ao Ensaio Fermentativo 1 com caldo de sorgo.

** Referente ao Ensaio Fermentativo 3 com caldo de sorgo.

Fonte: Adaptado de Barcelos (2012)

Em cada experimento conduzido, a constituição do substrato inicial foi uma mistura de sacarose, glicose e frutose, com diferentes frações de cada componente, mas que juntas somavam valores próximos de concentração mássica de açúcares totais redutores. Com o fim de manter a simplicidade do modelo do presente trabalho, os resultados de concentração desses açúcares ao longo do tempo foram agrupados em uma categoria única e mais geral de concentração de substrato. A concentração inicial dos produtos foi considerada nula.

Os coeficientes de rendimento do Quadro 3.1 foram calculados considerando a variação global das concentrações entre o tempo inicial e o tempo final de fermentação, t_f , definido pelo momento de estabilização da produção de etanol devido ao esgotamento quase total de substrato.

A partir da linearização dos pontos experimentais de concentração celular, foi identificada a fase exponencial de crescimento das leveduras. O coeficiente angular do

conjunto de pontos nesse intervalo foi aproveitado como chute inicial para o parâmetro cinético μ_{max} do modelo.

3.1.2. Simulação

As equações e variáveis foram transcritas para o ambiente do Google Colaboratory. Para a resolução do sistema de equações diferenciais (Equações 3.1 a 3.4), com condições iniciais definidas, foi utilizada a função *solve_ivp* da biblioteca SciPy. Por padrão, o método de Runge-Kutta explícito é aplicado, sendo o passo de tempo definido pelo parâmetro *t_eval* da função, o qual se constitui de um vetor com os valores de tempo (em horas) do início ao fim do processo. Para a simulação dos cenários A e B, foram definidas 650 posições para esse vetor, resultando em passos de tempo de 62 e 44 segundos, respectivamente.

A partir do ajuste dos parâmetros cinéticos, os perfis de concentração foram construídos no próprio ambiente de simulação, buscando a melhor sobreposição aos dados experimentais de Barcelos (2012) de fermentação dos açúcares do caldo de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae*.

3.2. Simulação da produção de etanol a partir da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo

Tendo como base o mesmo modelo cinético descrito anteriormente e a utilização do ambiente do Google Colaboratory, foi desenvolvida e executada a simulação da produção de etanol a partir conversão da glicose dos grãos de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae*.

3.3.1. Parâmetros

O Quadro 3.2 contém os valores das condições iniciais, tempo de fermentação e os rendimentos dos ensaios fermentativos utilizando os grãos de sorgo.

Para a modelagem, considerou-se que o substrato inicial se constituía totalmente de glicose, advinda do pré-tratamento do amido dos grãos por hidrólise enzimática. Este processo também resultou na formação de maltose, porém em concentrações ao redor de 7 g.L⁻¹. Além disso, os ensaios realizados mostraram que a concentração de maltose variou de forma não significativa ao longo da fermentação, visto que há uma preferência na metabolização total da glicose do meio pelas leveduras antes que se dê o consumo de maltose.

Quadro 3.2. Parâmetros e condições iniciais da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo.

Parâmetro	Cenário C*	Cenário D**
$C_{S,0}$ (g/L)	206,0	170
$C_{X,0}$ (g/L)	6,3	8
t_f (h)	28,0	16,0
$Y_{X/S}$	0,032	0,047
$Y_{X/E}$	0,068	0,092
$Y_{X/G}$	2,095	2,150

* Referente ao Ensaio Fermentativo 4 com grãos de sorgo.

** Referente ao Ensaio Fermentativo 2 com grãos de sorgo.

Fonte: Adaptado de Barcelos (2012)

Na tese de Barcelos (2012), o ensaio fermentativo referente ao cenário C deste trabalho foi o único em que se utilizou o hidrolisado filtrado dos grãos de sorgo como substrato, de modo a possibilitar a medição das concentrações celulares por turbidimetria e a construção do perfil cinético. Ou seja, a matéria sólida dos grãos não afetada pela ação enzimática foi removida para a fermentação, diferente do cenário D, no qual o hidrolisado foi utilizado integralmente, como é comum na produção de etanol em escala industrial a partir de cereais. Neste último caso, portanto, não se tem conhecimento do quanto a concentração celular variou, apenas do seu valor inicial.

Para se viabilizar a modelagem do cenário D, tomou-se a hipótese de que a concentração de células ao fim da fermentação equivaleu ao dobro da concentração inicial, ou seja, 16 g.L^{-1} . Essa hipótese foi fundamentada a partir da observação dos demais ensaios fermentativos em que o crescimento celular foi mensurado experimentalmente. Quanto aos produtos extracelulares, suas concentrações no início da fermentação foram consideradas nulas.

Os coeficientes de rendimento do Quadro 3.2 foram calculados considerando a variação global das concentrações entre o tempo inicial e o tempo final de fermentação, t_f , definido pelo momento de estabilização da produção de etanol devido ao esgotamento quase total de substrato.

Análogo ao que foi descrito anteriormente, a identificação da fase exponencial de crescimento das leveduras no cenário C serviu para se obter um chute inicial para o parâmetro cinético μ_{max} do modelo, a partir do coeficiente angular do conjunto de pontos linearizados desse intervalo. Os parâmetros ajustados do cenário C foram utilizados como chutes iniciais para a modelagem do cenário D, visto que não se dispunham dos dados experimentais de crescimento celular neste caso.

3.3.2. Simulação

Semelhante à simulação dos Cenários A e B, o modelo dos cenários C e D foi transcrito para o ambiente do Google Colaboratory. Para a resolução do sistema de equações com condições iniciais definidas foi utilizada a função *solve_ivp* da biblioteca SciPy, sendo o passo de tempo definido de 120 segundos (840 posições no vetor *t_eval*) para o Cenário C e de 96 segundos (600 posições no vetor) para o cenário D.

A partir do ajuste dos parâmetros cinéticos, os perfis de concentração foram construídos no próprio ambiente de simulação, buscando a melhor sobreposição aos dados experimentais de Barcelos (2012) de fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 reitera as condições da fermentação realizada em cada cenário, expondo os resultados calculados de produtividade e rendimento em etanol individualmente, além das respectivas eficiências de fermentação, considerando o rendimento teórico máximo de 0,511 g etanol/g glicose. Reitera-se que as condições de temperatura, agitação e pH foram as mesmas para os quatro processos selecionados, diferindo basicamente em seus teores iniciais de substrato e leveduras. Enquanto nos cenários A e B ocorreu sacarificação e fermentação simultâneas, nos cenários C e D o substrato era composto majoritariamente por glicose.

Tabela 4.1. Visão geral de cada cenário modelado, com valores de produtividade (Q_E) e rendimento ($Y_{E/S}$) em etanol e eficiência da fermentação (η_E).

Cenário	A	B	C	D
Fração do sorgo	Sacarínea	Sacarínea	Amilácea (hidrolisado filtrado)	Amilácea (hidrolisado não filtrado)
$C_{S,0}$ (g.L ⁻¹)	161,97	181,18	206	170
$C_{X,0}$ (g.L ⁻¹)	8	12	6,3	8
t_f (h)	11,25	8	28	16
C_E (g.L ⁻¹)	71,74	72	97	86,7
Q_E (g.L ⁻¹ .h ⁻¹)	6,38	9	3,46	5,42
$Y_{E/S}$ (g.g ⁻¹)	0,443	0,407	0,471	0,510
η_E (%)	86,7	79,6	91,64	99,80

Fonte: Adaptado de Barcelos (2012).

Observando-se os valores de concentração final de etanol, os cenários A e B atingiram valores quase idênticos, superados pela concentração dos cenários C e D, em compensação ao maior tempo de fermentação associado. Por outro lado, o rendimento em etanol do cenário C está mais próximo ao do cenário A. Apesar do Cenário B ter sido o menos eficiente em formação de etanol, ele apresentou a maior produtividade em etanol, justamente pela menor duração da fermentação, decorrente do inóculo mais concentrado em comparação ao cenário A. Inclusive, os tempos de fermentação se encontram dentro das faixas usuais dos processos industriais em que se utiliza o caldo de cana-de-açúcar, para os cenários A e B, ou o milho, para os cenários C e D.

As Figuras 4.1 a 4.4 ilustram os perfis experimentais (pontos) e simulados (linhas contínuas) de concentração de células, ART e produtos obtidos nos cenários A, B, C e D.

Figura 4.1. Cenário A - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae* ($V_R = 0,8$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).

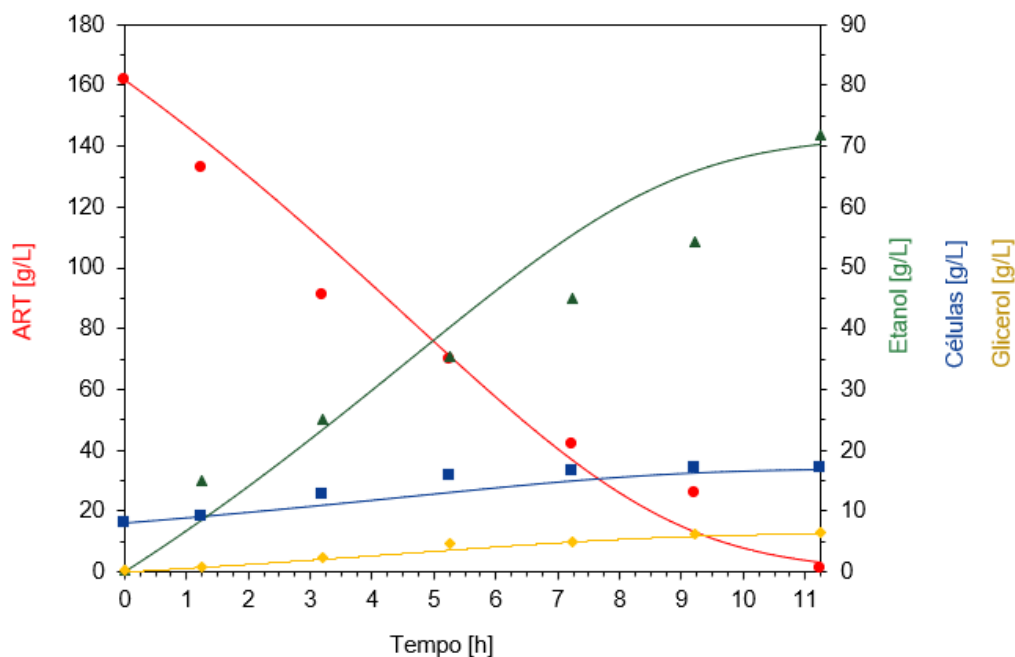


Figura 4.2. Cenário B - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares do caldo de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae* ($V_R = 0,8$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).

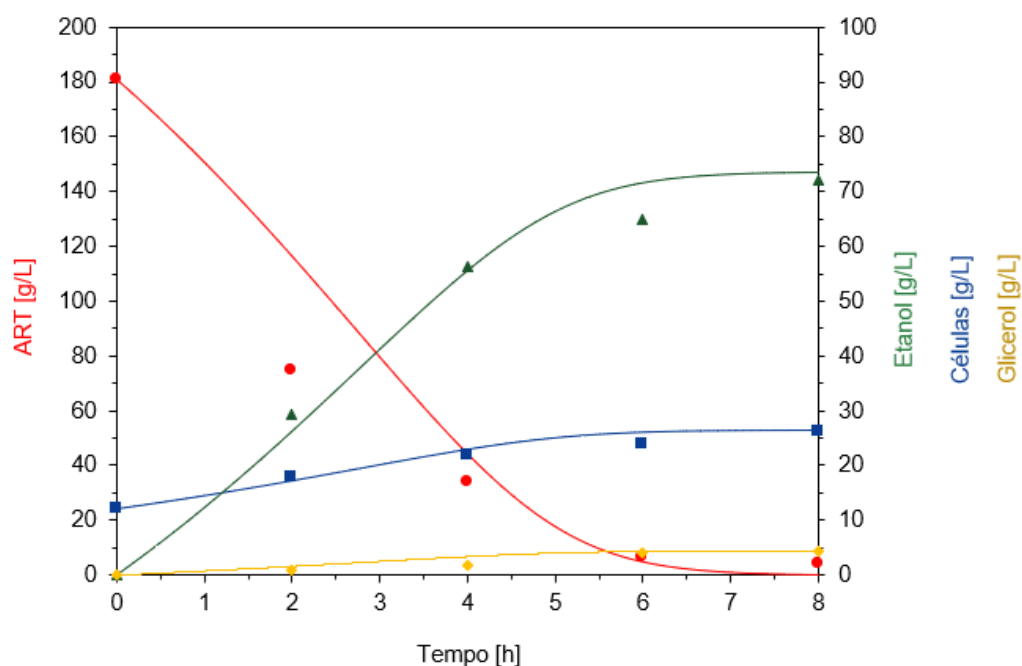


Figura 4.3. Cenário C - Variação das concentrações de células (■), substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae* ($V_R = 2$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).

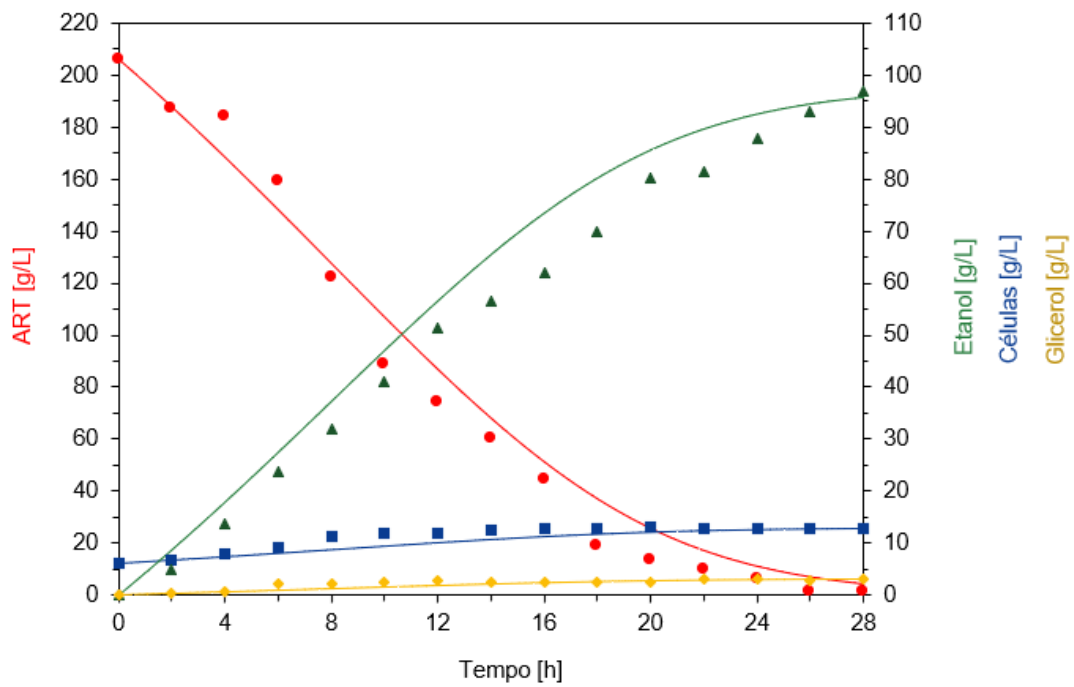
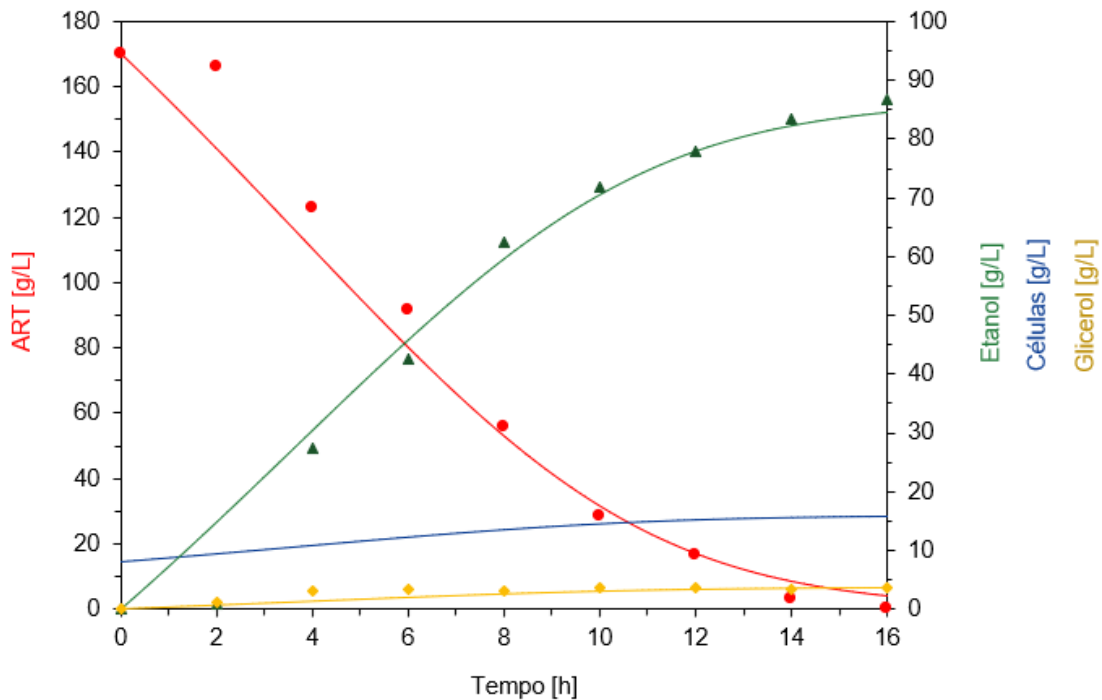


Figura 4.4. Cenário D - Variação das concentrações de células, substrato (●), etanol (▲) e glicerol (◆) na simulação da fermentação dos açúcares dos grãos de sorgo por *Saccharomyces cerevisiae* ($V_R = 2$ L; $T = 37$ °C; 200 rpm; pH = 4,5).



Pode-se observar a partir das Figuras 4.1 a 4.4 que as fermentações apresentaram perfis característicos de um processo realizado em batelada, com a taxa de crescimento celular regendo os períodos de aceleração e estabilização do consumo de substrato e da formação dos produtos. A concentração celular, por sua vez, atinge um patamar com o esgotamento dos açúcares. Observa-se também como o tempo de fermentação se eleva com o aumento da razão entre as concentrações iniciais de substrato e de células ($C_{S,0}/C_{X,0}$), sendo maior para o cenário C.

Para os perfis de concentração celular e de glicerol, nota-se uma boa proximidade dos resultados simulados aos experimentais, enquanto as variações são mais evidentes para os pontos intermediários dos perfis de concentração de ART e de etanol. Essas variações poderiam ser atribuídas a uma dificuldade em se coletar amostras homogêneas do meio, apesar dos pequenos volumes reacionais e das boas velocidades de agitação. Destaca-se que a aferição experimental da concentração de cada componente no trabalho original (Barcelos, 2012) foi realizada uma única vez por marca de tempo. No caso do cenário B, há apenas cinco pontos experimentais por perfil de concentração até o fim da fermentação, o que dificulta a avaliação dos desvios.

De modo geral, pode-se considerar que o modelo de Monod descreveu suficientemente bem o comportamento das concentrações de células (C_X), substrato (C_S), etanol (C_E) e de glicerol (C_G) em todos os cenários, mostrando que as hipóteses definidas na metodologia são pertinentes quanto à realidade do fenômeno estudado. Para o cenário D em particular, a hipótese de que a concentração de células teria dobrado ao fim do processo resultou em um bom ajuste aos dados experimentais disponíveis. No entanto, nota-se neste último cenário um período em que a atividade celular (consumo de substrato e formação de produtos) foi mínima até as 2 horas do processo, o que pode se constituir como fonte de erro para o modelo.

A Figura 4.5 reúne gráficos dos valores experimentais *versus* valores simulados de concentrações de ART e de etanol para os cenários A, B, C e D, enquanto a Tabela 4.2 apresenta os parâmetros cinéticos do modelo estimados a partir do seu ajuste às concentrações obtidas por Barcelos (2012) nos ensaios fermentativos. A Figura 4.5 reforça a qualidade do ajuste do modelo, mostrando que as linhas de tendência geradas por ajuste linear dos pontos (retas contínuas) se encontram dentro dos intervalos de 10% de desvio (regiões entre as linhas tracejadas). Apesar de alguns pontos intermediários ultrapassarem esse intervalo de erro, a predição dos valores de concentração final teve sucesso.

Figura 4.5. Concentrações experimentais *versus* simuladas de substrato (C_S) e de etanol (C_E) dos cenários modelados.

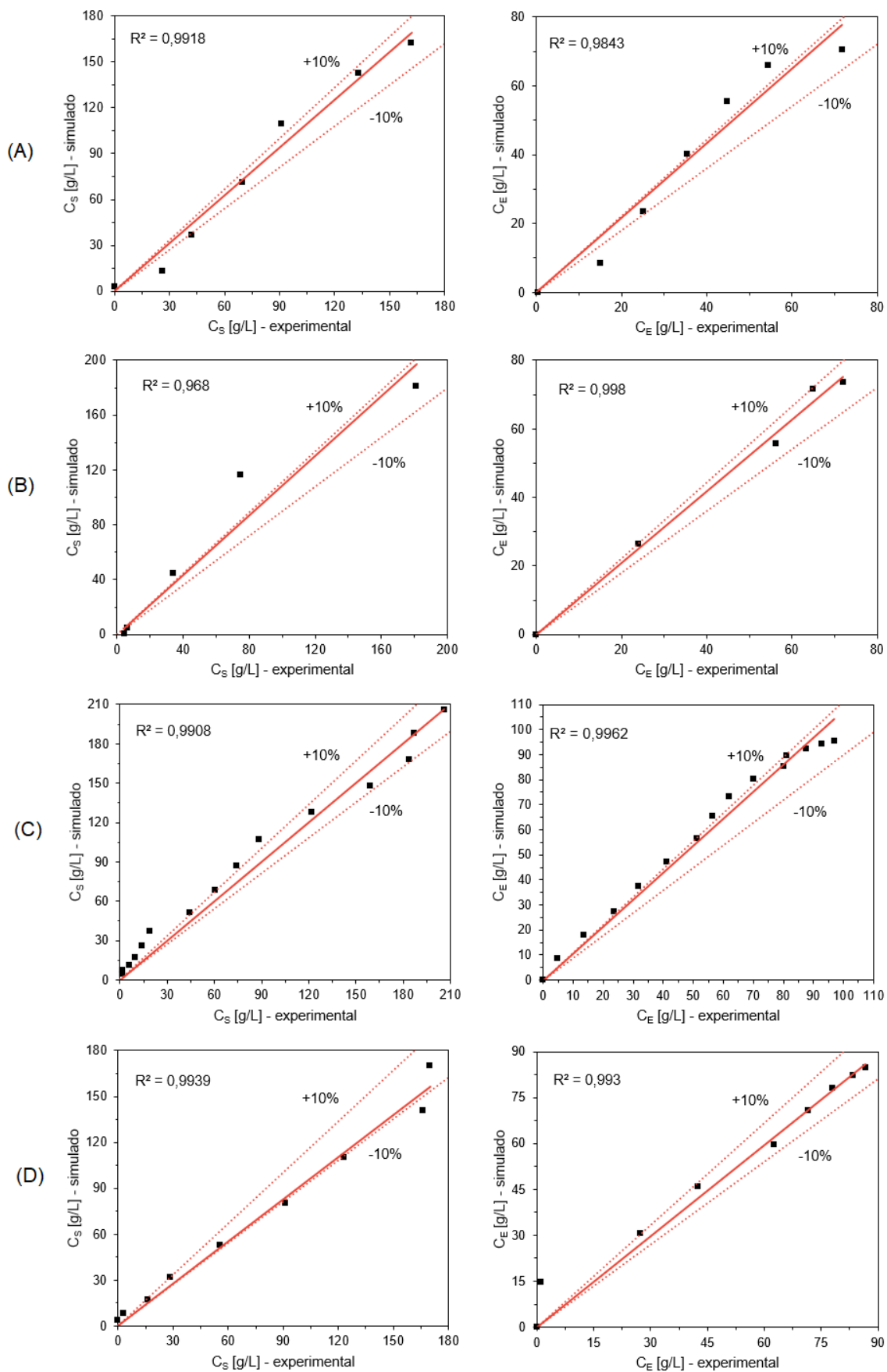


Tabela 4.2. Parâmetros cinéticos estimados para os cenários selecionados segundo o modelo de crescimento celular de Monod.

Cenário	A	B	C	D
μ_{max} (h ⁻¹)	0,135	0,24	0,077	0,14
K_S (g.L ⁻¹)	50	50	120	120

Analisando os resultados obtidos de K_S , verifica-se que foi possível utilizar o mesmo valor para ajustar os modelos cujo substrato é da mesma natureza (mistura de açúcares do caldo de sorgo, para os cenários A e B, e amido sacarificado dos grãos para C e D). Fora isso, os pares de cenários tiveram em comum concentrações finais de etanol mais próximas entre si. Em relação ao μ_{max} , nota-se que ele foi maior para o cenário com maior produtividade em etanol (B), menor para o cenário com menor produtividade (C) e teve valores bem próximos para os cenários restantes com produtividades intermediárias (A e D).

A literatura diz que a cinética da fermentação alcoólica é dependente das condições de cultura e da composição do meio fermentativo, além de propriedades específicas do microrganismo, sendo importante para a identificação das limitações para a produção de etanol (LAZAROVA e IGNATOVA, 1991). Dito isto, a taxa de reprodução celular é tão alta quanto as condições do meio sejam toleráveis. Dentre os cenários estudados, uma possível inibição por elevada concentração inicial de glicose é notada no cenário C, refletindo no menor valor de μ_{max} . Já para os cenários A e D, com condições iniciais muito parecidas em termos de inóculo e ART, a máxima de taxa de crescimento celular diferiu em menos de 4%, porém as demais características do meio ditaram cinéticas distintas, principalmente considerando o tempo de fermentação.

Conhecendo os parâmetros para modelagem do processo fermentativo, pode-se prever a eficiência e a performance da operação nos biorreatores industriais, o que permite aprimorar o controle de variáveis, buscando a otimização, e até a projeção de novos equipamentos (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

A partir dos resultados dos ensaios fermentativos, foi possível estimar o volume que seria produzido de etanol por hectare de sorgo sacarino em uma usina, aproveitando os grãos e o caldo da moagem. Para isso, foram escolhidos os cenários de maior produtividade volumétrica em produto para cada tipo de substrato, os cenários B e D.

Para o teor de 18,1° Brix, estima-se uma densidade de 1,075 g.cm⁻³ do caldo de sorgo que chegaria para ser fermentado.³ O cenário B produziu uma solução final com 72 g.L⁻¹ de etanol, ou 0,0912 L de etanol por litro de vinho (tomando a densidade de 0,789 g.cm⁻³ para o etanol). Assim, uma tonelada desse caldo (ou 930,23 L) é capaz de gerar cerca de 84,8 L de etanol.

No caso dos grãos de sorgo, Barcelos (2012) chegou ao valor de 68% para o teor de amido em base úmida. Para a hidrólise enzimática, a relação sólido/líquido do material moído foi ajustada para 1/3 de g de grão.mL⁻¹. Ou seja, uma tonelada de grãos corresponderia a 3000 L de solução a ser hidrolisada. Por balanço de massa, 1 g de amido hidrolisado deve gerar 1,1 g de açúcares redutores, sendo que a eficiência deste processo foi de 98%. Antes da fermentação, o hidrolisado foi diluído em 1,44 vezes para que o mosto chegasse na concentração de 170 g.L⁻¹ de ART. O cenário D gerou um vinho de fermentação com 86,7 g.L⁻¹ de etanol, ou seja, 0,110 L de etanol para cada litro de vinho. Assim, uma tonelada de grãos de sorgo sacarino teria o potencial de produzir 475,2 L de etanol.

O Quadro 4.1 apresenta os rendimentos em etanol calculados e o total que seria produzido por área cultivada de sorgo, processando as suas frações sacarínea e amilácea. Os rendimentos de biomassa são referentes ao híbrido de sorgo sacarino utilizado para os ensaios fermentativos. Pode-se dizer que o valor calculado de 3.816 L/ha para o rendimento do caldo de sorgo sacarino está dentro do esperado, sabendo que as cultivares mantidas no mercado pela Embrapa em 2011 apresentavam o potencial de produzir até 4 mil litros de etanol por hectare (SANTOS, 2011).

Quadro 4.1. Rendimento de biomassa e produção de etanol a partir das frações sacarínea e amilácea do sorgo sacarino.

	Biomassa* (ton/ha)	Etanol	
		(L/ton)	(L/ha)
Caldo	45	84,8	3.816
Grãos	5	475,2	2.376
		Total	6.192

* Klink (apud BARCELOS, 2012)

Nota-se uma geração total de cerca de 6,2 mil litros de etanol por hectare de sorgo sacarino, valor inferior ao rendimento em etanol dos colmos de cana-de-açúcar no Brasil, estimado em cerca de 7.580 L/ha ao longo de um ano (ROLZ *et al.*, 2017). Considerando

³ Densidade obtida em: <https://fermentandocaos.com.br/calculadora-brix-densidade-e-abv/>

apenas o rendimento calculado para o grão de sorgo sacarino, ele se aproximou em 64% do rendimento médio em etanol do grão de milho por área cultivada, que é de aproximadamente 3,7 mil L/ha (MUSSATTO *et al.*, 2010).

Para uma usina flex de etanol, pode-se julgar que seria preferível a utilização da cana-de-açúcar e do milho. No entanto, existem outros pontos para se atentar além do rendimento por área de uma safra:

- Pode-se aumentar a biomassa produzida em um ano pela colheita mais frequente do sorgo, visto que seu ciclo de crescimento é curto em comparação ao da cana, além de sua boa adaptabilidade às variações climáticas sazonais. Na realidade, as mesmas terras poderiam servir para até três cortes do sorgo sacarino em um mesmo ano, sem a necessidade de replantio, como descrito por Rolz *et al.* (2017). Sugere-se, assim, que a produtividade anual de ART dos colmos por hectare poderia se equiparar à da cana-de-açúcar no Brasil;
- Havendo disponibilidade local de uma matéria-prima amilácea, os grãos de sorgo, além de uma matéria-prima sacarínea, os colmos de sorgo, poderiam ser reduzidos os gastos para a obtenção de outros cereais (supondo uma usina flex hipotética cujas terras ao redor se destinem à cultura da cana). Ou seja, haveria menos despesas com o transporte de grãos, acompanhado de uma possível redução da pegada de carbono da cadeia logística;
- São obtidos subprodutos de valor no processamento do sorgo, como o destilado seco de grãos (DDG) e o bagaço de sorgo, aproveitado na cogeração de energia.

Apenas esses três pontos já mostram o peso que a matéria-prima escolhida tem para uma indústria, muitas vezes compondo a maior parcela entre os custos rotineiros.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O modelo matemático proposto para os processos fermentativos com *Saccharomyces cerevisiae* foi capaz de representar de forma satisfatória o comportamento dos processos com diferentes condições iniciais, tanto para o substrato de origem sacarínea (caldo de sorgo sacarino) como de origem amilácea (hidrolisado enzimático de grãos de sorgo sacarino).

Entre as possíveis fontes de erro, estão: dificuldade em se coletar amostras homogêneas do meio; realização de medidas únicas de concentração para cada componente por marca de tempo; pequena quantidade de pontos experimentais (cenário B); e atraso no início do processo fermentativo (cenário D).

Foi estimada uma produção de 6.192 L de etanol por hectare colhido do híbrido de sorgo sacarino, aproveitando tanto os seus grãos como o suco extraído de seu caule. A produtividade anual por área cultivada poderia chegar ao patamar do caldo da cana-de-açúcar, considerando até três colheitas possíveis do sorgo no mesmo ano. A espécie também possibilita arranjos logísticos diferentes dos convencionais, principalmente no caso de usinas flex, com estrutura para processar as frações sacarínea e amilácea do sorgo sacarino.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- Realizar ensaios de fermentação com os grãos de sorgo granífero e comparar com os resultados da variedade sacarina;
- Modelar a cinética do processo fermentativo de Barcelos (2012) utilizando hidrolisado hemicelulósico de bagaço de sorgo sacarino, o qual apresenta, além de glicose, as pentoses xilose e arabinose como substrato e, além de etanol, o xilitol como produto;
- Realizar ensaios de fermentação com o bagaço de outras variedades de sorgo, como o sorgo biomassa, e comparar com os resultados da variedade sacarina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, H. V.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, J. V. C.; BUCKERIDGE, M. S.; GOLDMAN, G. H. Scientific challenges of bioethanol production in Brazil. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 91, p. 1267-1275, 2011.

ANNUAL Ethanol Production. **RFA**, 2022. Disponível em:

<<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ANUÁRIO da Indústria Automobilística Brasileira 2022. **ANFAVEA** - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Brasil). Disponível em:

<<https://anfavea.com.br/site/anuarios/>>. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

BARCELOS, C. **Aproveitamento das frações sacarínea, amilácea e lignocelulósica do sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para a produção de bioetanol**. 2012.

Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BLACK, J. G. **Microbiologia: Fundamentos e Perspectivas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2002.

BOTHAST, R. J.; SCHLICHER, M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 67, n. 1, 2004.

BSBIOS investe na primeira usina de etanol de grande escala do Rio Grande do Sul.

BSBIOS, 2022. Disponível em : <<https://www.bsbios.com/pt/Noticia/bsbios-investe-na-primeira-usina-de-etanol-de-grande-escala-do-rio-grande-do-sul>>. Acesso em: 19 jul. 23.

BUORO, R. **Processo produtivo de etanol de segunda geração e seus aspectos**. 2021.

Monografia (Bacharel em Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

CAFFER, S. **Estudo de caso da substituição do ácido sulfúrico pelo ácido nítrico no tratamento ácido da levedura *Saccharomyces cerevisiae* no processo de fermentação etanólica de bancada**. 2015. Monografia (Programa de Pós-Graduação em Gestão do Setor Sucroenergético – MTA) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Catanduva, 2015.

CALDEIRA flex queima bagaço, palha, lignina e vinhaça. **CanaOnline**, 2014. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/caldeira-flex-queima-bagaco-palha-lignina-e-vinhaca.html>>. Acesso em: 31 de agosto de 2023.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; PEREIRA, F. T. F.; ALVARENGA, R. C.; KONZENL, E. A. Produção Orgânica de Grãos e Silagem de Milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 2.; SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE AGROECOLOGIA, 5.; SEMINÁRIO ESTADUAL SOBRE AGROECOLOGIA, 6., 2004, Porto Alegre. **Agrobiodiversidade: base para sociedades sustentáveis: anais**. [Brasília]: Embrapa; Porto Alegre: Emater-RS, 2004.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 10, safra 2022/23, n. 9 nono levantamento, junho 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 5 jul. 2023.

DÔRR, C. Oeste da Bahia receberá a primeira usina de etanol de milho e sorgo do Nordeste. **Revista Cultivar**, 2022. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/noticias/oeste-da-bahia-recebera-a-primeira-usina-de-etanol-de-milho-e-sorgo-do-nordeste>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

ENTRESSAFRA da cana-de-açúcar impacta no preço dos combustíveis. **UDOP**, 2022. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/noticia/2022/10/19/entressafra-da-cana-de-acucar-impacta-no-preco-dos-combustiveis.html>>. Acesso em: 12 de agosto de 2023.

ETANOL de cana x etanol de milho. **Piracicaba Engenharia**, 2019. Disponível em: <<https://www.piracicabaengenharia.com.br/etanol-de-cana-x-etanol-de-milho/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

FARIAS, D.; ANDRADE, R. R.; MAUGERI, F. Kinetic Modeling of Ethanol Production by *Scheffersomyces stipitis* from xylose. **Appl. Biochem. Biotechnol.** 172(1):361-79, 2014.

FENG, Q.; LIU, Z. L.; WEBER, S. A.; LI, S. Signature pathway expression of xylose utilization in the genetically engineered industrial yeast *Saccharomyces cerevisiae*. **PLoS ONE.** 13(4): e0195633, 2018.

FERNANDES, A. P. F. V. **Leveduras isoladas de produtos frutícolas: capacidade fermentativa e estudos sobre a H⁺-ATPase da membrana plasmática.** 2008. Tese (Doutorado em Biologia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

GODIN, B., GHYSEL, F., AGNEESSENS, R., *et al.* Cellulose, hemicelluloses, lignin, and ash contents in various lignocellulosic crops for second generation bioethanol production. **Biotechnol. Agron. Soc. Environ.**, vol. 14, p. 549–560, 2010.

GODOY, A.; AMORIM, H. V.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, A. J. Continuous and batch fermentation processes: advantages and disadvantages of these processes in the Brazilian ethanol production. **Int Sugar J.**, 110:175–181, 2008.

GRIPPA, M. J. C. **Planta flex no Mato Grosso.** 2012. Trabalho (Pós-graduação MBA em Gestão do Agronegócio) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: < <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/44422/R%20-%20E%20-%20MARIO%20JOSE%20CACHO%20GRIPPA.pdf>>. Acesso em: 28 jul. 23.

HESS, J. R., WRIGHT, C. T., KENNEY, K. L. Cellulosic biomass feedstocks and logistics for ethanol production. **Biofuel Bioprod. Biorefin.**, 1(1):181–190, 2007.

HOLZBERG, I.; FINN, R. K.; STEINBRAUS, K. H. A kinetic study of the alcoholic fermentation of grape juice. **Biotechnol. Bioeng.**, 9: 413-427, 1967.

KUBECKA, B. Sorghum plays role in ethanol's impact. **Ethanol producer magazine**, 2011. Disponível em: <<https://ethanolproducer.com/articles/sorghum-plays-role-in-ethanols-impact-7408>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

LAZAROVA, G.; IGNATOVA, M. The Ethanol Fermentation Kinetics as a Function of the Substrate Type and Concentration. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 5:3, p. 37-42, 1991.

LIMA, U. D. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHIMIDELL, W. **Biotecnologia Industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. Vol. 3. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

LYND, L. R. *et al.* How biotech can transform biofuels. **Nature Biotechnology**, v.26, p.169-172, 2008.

LOPES, C. H.; BORGES, M. T. M. R. **Controle na fabricação de álcool**. São Carlos: Ed. UFSCar, 2009.

MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. Produção de álcool combustível a partir de carboidratos. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, ano 15, n. 3, 2006. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/63360/1/Paginas-de-pol-agr-03-20062-p.-64-78.pdf>> Acesso em: 27 jul. 2023.

MACHADO, N. Como o etanol está se reinventando para suprir a demanda por novos combustíveis. **epbr**, 2022. Disponível em: <<https://epbr.com.br/como-o-etanol-esta-se-reinventando-para-suprir-a-demanda-por-novos-combustiveis>>. Acesso em: 27 jun. 2023.

MAIORELLA, B.; BLANCH, H.W.; WILKE, C.R. By-product inhibition effects on ethanolic fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnol. Bioeng**, v. 25, 103–121, 1983.

MARZZOCO, A; TORRES, B.B. **Bioquímica básica**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1999.

MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol**: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

MENEZES, C. B. (editor técnico). **Melhoramento genético de sorgo**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2021.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; GUIMARAES, P. M. R.; SILVA, J. P. A.; CARNEIRO, L. M.; ROBERTO, I. C.; VICENTE, A.; DOMINGUES, L.; TEIXEIRA, J. A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. **Biotechnology Advances**, v.28, p.817-830, 2010.

MUTEGI, E., SAGNARD, F., MURAYA, M. *et al.* Ecogeographical distribution of wild, weedy and cultivated *Sorghum bicolor* (L.) Moench in Kenya: Implications for conservation and crop-to-wild gene flow. **Genetic Resources and Crop Evolution**, 57(2), 243–253, 2010.

NATION'S second-largest ethanol co. to produce fuel from sorghum. **Governors' Biofuels Coalition**, 2013. Disponível em: <<https://www.governorsbiofuelscoalition.org/nations-second-largest-ethanol-co-to-produce-fuel-from-sorghum/>>. Acesso em: 9 de agosto de 2023.

NETO, N. Sorgo: 5 práticas para elevar a produtividade da produção. **Siagri**, 2023. Disponível em: <<https://www.siagri.com.br/sorgo/>>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

NICHOLS, N. N.; BOTHAST, R. J. Production of ethanol from grain. Genetic improvement of bioenergy crops. New York: **Springer**, p. 75-88, 2008.

OLIVEIRA, S. C.; STREMEL, D. P.; DECHECHI, E. C.; PEREIRA, F. M. Kinetic modeling of 1-G ethanol fermentations. In: JOZALA, A. (Ed.), **Fermentation Processes** (pp. 93–117). IntechOpen, 2017.

OLSSON, L; HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for

ethanol production. **Enzyme and Microbial Technology**, v.18, p. 312-331, 1996.

PEREIRA, A. C.; dos ANJOS, A. S.; de OLIVEIRA, E. P. *et al.* Performance agrônômica de sorgo sacarino avaliados na região de Cáceres-Mato Grosso. **Research Society and Development**, 11(8):1-8, 2022.

PETROLI, V. Sorgo pode ser alternativa para complementar milho na produção de etanol. **Canal Rural**, Rondonópolis, 2023. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/mato-grosso/sorgo-pode-ser-alternativa-para-complementar-milho-na-producao-de-etanol/>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

PITARELO, A. P. **Avaliação da susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. 2007. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ROLZ, C.; de LEÓN, R; MENDIZÁBAL de MONTENEGRO, A. L.; PORRAS, V.; CIFUENTES, R. A multiple harvest cultivation strategy for ethanol production from sweet sorghum throughout the year in tropical ecosystems. **Renewable Energy**, v. 106, p. 103-110. 2017.

ROSSELL, C. E. V. Tecnologia Agroindustrial de Sorgo Sacarino. **Seminário Temático de Sorgo Sacarino**. EMBRAPA Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 20 e 21 Setembro, 2011.

SANTOS, G. S. Concorrência ampliada dos produtos do sorgo sacarino na entressafra da cana-de-açúcar no Brasil. In **Agroenergia em Revista**, 11(3):39-42. Embrapa Agroenergia, 2011.

SARROUH, B., DOS SANTOS, J., CUNHA, M., BRANCO, R. Potential biomass resources for cellulosic ethanol production in Brazil: Availability, feedstock analysis, feedstock composition, and conversion yields. In **Biofuels in Brazil: Fundamental Aspects, Recent Developments, and Future Perspectives** (p. 97–123). Springer, 2014.

SILVA, J., SERRA, G., MOREIRA, J. *et al.* Energy Balance for Ethyl Alcohol Production from Crops. **Science**, v. 201, p. 903-906. 1978

SIMEONE, M., DE OLIVEIRA, P., KANUTO, K. *et al.* Caracterização de genótipos de sorgo biomassa para bioenergia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 22.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 17., 2018, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2018.

SIQUEIRA, L. Raízen e Ceres aumentam aposta no Sorgo Sacarino. **NovaCana**, 2015. Disponível em : <<https://www.novacana.com/noticias/raizen-ceres-aposta-sorgo-sacarino-170315>>. Acesso em: 18 jul. 23.

SOUZA, C. C.; DANTAS, J. P.; SILVA, S. M.; ALMEIDA, F. A.; SILVA, L.E. Produtividade do sorgo granífero cv. Sacarino e qualidade de produtos formulados isoladamente ou combinados ao caldo de cana-de-açúcar. **Ciência Tecnologia Alimentos**, v.25, n.3, p.512-517, 2005.

SOUZA, V. F.; PARRELLA, R. A.; PORTUGAL, A. F., *et al.* Desempenho de Cultivares de Sorgo Sacarino em Duas Épocas de Plantio no Norte de Minas Gerais Visando a Produção de Etanol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, Búzios. Panorama atual e perspectivas do melhoramento de plantas no Brasil. 2011.

SPONCHIADO, S.; TARDIN, F. D.; CARDOSO, W. S. *et al.* Utilização do sorgo granífero para produção de etanol no estado do Mato Grosso. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOMASSA, 2., 2017, Curitiba. **Anais**. Curitiba: [s.n.], 2017.

SZULCZYK, K. R.; MCCARL, B. A.; CORNFORTH, G. Market penetration of ethanol. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.394-403, 2010.

TAYLOR, J. R. N., SCHOBBER, T. J.; BEAN, S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. **J. Cereal Sci.** 44, 252–271, 2006.

UNICADATA. **Observatório da Cana**, 2023. Disponível em: <<https://observatoriodacana.com.br/>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

VASCONCELOS, J. N. Ethanol Fermentation. In: SANTOS F.; BORÉM A.; CALDAS C. **Sugarcane: Agricultural production, bioenergy and ethanol**. Londres: Elsevier, 2015. p. 311-340.

VASILAKOGLUA, I.; DHIMAB, K.; KARAGIANNIDISB, N.; GATSISB, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. **Field Crops Research**, v.120, p.38–46, 2011.

VIANA, G. Produção de sorgo no Brasil sobe mais de 36% em apenas uma safra. **Embrapa**, 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/73811127/producao-de-sorgo-no-brasil-sobe-mais-de-36-em-apenas-uma-safra>>. Acesso em: 2 jul. 2023.