



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOTECNOLOGIA E BIOPROCESSOS**

SABRINA SOUSA DE LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROMEL EM
BIORREATOR EM BATELADA UTILIZANDO A LEVEDURA
*SACCHAROMYCES CEREVISIAE***

**SUMÉ - PB
2022**

SABRINA SOUSA DE LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROMEL EM
BIORREATOR EM BATELADA UTILIZANDO A LEVEDURA
*SACCHAROMYCES CEREVISIAE***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

Orientador: Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.

**SUMÉ - PB
2022**



L732m Lima, Sabrina Sousa de.

Modelagem e simulação da produção de hidromel em biorreator em batelada utilizando a levedura *Saccharomyces Cerevisiae*. / Sabrina Sousa de Lima. - 2022.

58 f.

Orientador: Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

1. Processos fermentativos. 2. Modelagem e simulação. 3. Hidromel. 4. Reator em batelada. 5. Levedura *Saccharomyces Cerevisiae*. 6. Estequeotomia da reação. 7. Cinética. I. Nunes, Bruno Rafael Pereira. II. Título.

CDU: 663.1(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

SABRINA SOUSA DE LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROMEL EM
BIORREATOR EM BATELADA UTILIZANDO A LEVEDURA
*SACCHAROMYCES CEREVISIAE***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

BANCA EXAMINADORA:

**Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.
Orientador - UAEB/UFCG/CDSA**

**Professor Dr. Janduy Guerra Araújo.
Examinador Interno - UAEB/UFCG/CDSA**

**Professora Dr. Tatiana Araújo Simões.
Examinadora Externa - DCC/CI/UFPB**

Trabalho aprovado em: 04 de abril de 2022.

SUMÉ - PB

Ao meu pai, Valdemar Francisco de Lima (in memoriam) e a minha mãe, Maria dos Milagres Sousa, que é meu alicerce e força para alcançar todos os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo discernimento e por me manter de pé diante de todas as dificuldades encontradas ao longo dessa caminhada.

À minha mãe, Maria dos Milagres por me apoiar e me incentivar até nos meus piores dias, por nunca ter me deixado desistir, e por ser a minha motivação para buscar sempre o melhor para a minha vida.

Ao meu melhor amigo, namorado, noivo e companheiro de vida, D'ávilla Jhonny por me apoiar, me incentivar e sempre acreditar no meu potencial, por sempre estar do meu lado enfrentando todas as dificuldades que surgiram, por nunca soltar a minha mão e permanecer sempre comigo, sem ele esse trabalho não seria possível.

À minha amiga/irmã e minha maior incentivadora, Suenia Nunes por sempre me incentivar e me mostrar que sou capaz de sempre fazer mais do que eu possa imaginar, por sempre me ajudar nos momentos difíceis e me mostrar o lado bom das coisas, por me ouvir e por me proporcionar diversos momentos de descontração, e por tornar essa caminhada mais leve.

À minha amiga de alma, Ester Sousa que apesar da distância sempre esteve torcendo por mim.

À Virgínia e Brenda, por terem sido o meu “ninguém solta a mão de ninguém” e por todo apoio e incentivo nessa reta final.

Aos meus colegas do 2016.1 que foram um presente de Deus na minha vida, Judieldo, Luzia, Eliel, Paulo e José Carlos, sou extremamente grata por ter conhecido e convivido com vocês.

Aos professores Ana Cristina e Patrício Félix pela oportunidade de participar dos seus projetos de extensão e aprender com vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Rafael foi um privilégio enorme ter sido sua aluna e orientanda, muito obrigada pela contribuição na minha formação, pelos ensinamentos e paciência, e em especial por ter aceitado me orientar nesse trabalho.

À todos que contribuíram de alguma forma para a minha formação.

O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.

Henry Ford.

LIMA, S. S. de. **Modelagem e Simulação da Produção de Hidromel em Biorreator em Batelada Utilizando a Levedura *Saccharomyces Cerevisiae***. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos), Universidade Federal de Campina Grande, Sumé-PB, 2022.

RESUMO

O hidromel é uma bebida alcoólica obtida a partir da fermentação, usando mel como substrato. Nesses processos é de grande importância o conhecimento da cinética, para o entendimento das taxas de crescimento celular, consumo do substrato e geração de produto. Os parâmetros cinéticos associados à modelagem e ao planejamento experimental permitem realizar simulações e determinar as melhores condições de operação. Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo obter um modelo matemático que pudesse representar o comportamento cinético na produção do hidromel, em batelada e aplicando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Objetivou-se também realizar a simulação para diferentes concentrações iniciais de células e de substrato, visando o alcance de condições ótimas. Foi aplicado um modelo matemático, não estruturado e não segregado, partindo de um balanço de massa para cada espécie presente no biorreator, sendo gerado um conjunto de equações diferenciais que foi resolvido utilizando o software Polymath®. Após ajuste do modelo aos dados estudados, foi realizada a simulação utilizando o planejamento composto central para definir as condições iniciais de operação. Dentre os modelos testados para crescimento celular, o de Levenspiel apresentou melhor ajuste em relação às concentrações de substrato e de produto, sendo os parâmetros cinéticos utilizados os rendimentos de células por substrato, $Y_{C/S} = 0,0087$ g/g, e de produto por substrato, $Y_{P/S} = 0,44$ g/g, a máxima velocidade específica de crescimento, $\mu_{m\acute{a}x} = 0,00153$ h⁻¹, e a constante de Monod, $K_s = 165$ g.L⁻¹. Após a simulação, verificou-se que a maior conversão de substrato, 95,78%, e o maior rendimento em produto, 74,46%, foram alcançados ao iniciar o processo com 2,4 g.L⁻¹ de células e 90 g.L⁻¹ de substrato. Com isso, conclui-se que o modelo aplicado, possibilitou avaliar as concentrações de substrato e de produto, tornando possível definir quais condições iniciais podem produzir melhores resultados na geração de produto e no consumo de substrato, evitando o desperdício de matéria-prima e maior rendimento, dentro das especificações contidas na norma vigente sobre bebidas.

Palavras-chave: parâmetros cinéticos; processos fermentativos; bioprocessos; otimização.

LIMA, S. S. de. **Modeling and Simulation of Mead Production in a Batch Bioreactor Using the Yeast *Saccharomyces Cerevisiae***. Course Conclusion Work (Biotechnology and Bioprocess Engineering), Federal University of Campina Grande, Sumé-PB, 2022.

ABSTRACT

Mead is an alcoholic beverage obtained from fermentation, using honey as substrate. In these processes, knowledge of kinetics is of great importance, for the understanding of cell growth rates, substrate consumption and product generation. The kinetic parameters associated with modeling and experimental planning allow simulations to be performed and the best operating conditions are determined. Therefore, the present work aimed to obtain a mathematical model that could represent the kinetic behavior in the production of mead, in batch and applying the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. The objective was also to perform the simulation for different initial concentrations of cells and substrate, aiming at the achievement of optimal conditions. A mathematical model was applied, unstructured and unsegregated, starting from a mass balance for each species present in the bioreactor, and a set of differential equations was generated that was solved using polymath® software. After adjusting the model to the studied data, the simulation was performed using the central composite planning to define the initial operating conditions. Among the models tested for cell growth, Levenspiel presented better fit in relation to substrate and product concentrations, and kinetic parameters used cell yields per substrate, $Y_{C/S} = 0.0087$ g/g, and product per substrate, $Y_{P/S} = 0.44$ g/g, maximum specific growth speed, $\mu_{max} = 0.00153$ h⁻¹, and Monod constant, $K_S = 165$ g.L⁻¹. After the simulation, it was found that the highest substrate conversion, 95.78%, and the highest yield in product, 74.46%, were achieved when starting the process with 2.4 g.L⁻¹ of cells and 90 g.L⁻¹ of substrate. Thus, it is concluded that the applied model made it possible to evaluate the substrate and product concentrations, making it possible to define which initial conditions can produce better results in product generation and substrate consumption, avoiding raw material waste and higher yield, within the specifications contained in the current beverage standard.

Keywords: kinetic parameters; fermentation processes; bioprocesses; optimization.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Cinética de fermentação para produção de hidromel utilizando a levedura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	42
Gráfico 2 -	Logaritmo natural da concentração de células em função do tempo.....	43
Gráfico 3 -	Velocidade específica de crescimento celular em função da concentração de substrato.....	44
Gráfico 4 -	Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração celular.....	45
Gráfico 5 -	Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração de substrato.....	46
Gráfico 6 -	Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração de produto.....	46
Gráfico 7 -	Comportamento cinético esperado para concentração celular.....	47
Gráfico 8 -	Comportamento cinético esperado para concentração de substrato.....	47
Gráfico 9 -	Comportamento cinético esperado para concentração de produto.....	48
Gráfico 10 -	Superfície de resposta e curva de nível para o Rendimento (%).....	50
Gráfico 11 -	Superfície de resposta e curva de nível para o Conversão (%).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de identidade e qualidade para o hidromel.....	22
Tabela 2 - Equações diferenciais aplicadas na modelagem.....	39
Tabela 3 - Equações explícitas aplicadas na modelagem.....	39
Tabela 4 - Parâmetros aplicados na modelagem.....	39
Tabela 5 - Estimativa inicial dos parâmetros e equações digitadas no Polymath.....	40
Tabela 6 - Níveis reais e codificados das variáveis independentes, concentração de células (C_{C0}) e de substrato (C_{S0}).....	41
Tabela 7 - Parâmetros cinéticos calculados a partir dos dados disponíveis em Brandão, Barroso e Lobato (2018).....	44
Tabela 8 - Estimativas finais dos parâmetros e equações digitadas no Polymath.....	45
Tabela 9 - Parâmetros cinéticos.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

C_P	Concentração de produto (g.L^{-1})
C_S	Concentração de substrato (g.L^{-1})
C_C	Concentração celular (g.L^{-1})
C_C^*	Concentração crítica celular na qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1})
K_S	Constante de saturação (g.L^{-1})
C_P	Concentração final de produto (g.L^{-1})
C_{P0}	Concentração inicial de produto (g.L^{-1})
C_P^*	Concentração crítica de produto na qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1})
Q_t	Concentração de etanol máxima teórica (g.L^{-1})
Q_e	Concentração de etanol experimental (g.L^{-1})
C_S	Concentração final de substrato (g.L^{-1})
C_{S0}	Concentração inicial de substrato (g.L^{-1})
μ	Velocidade específica de crescimento celular ($\text{g.L}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
μ_{\max}	Velocidade específica máxima de crescimento celular (h^{-1})
$Y_{P/S}$	Rendimento em produto em relação ao substrato (g.L^{-1})
$Y_{C/S}$	Fator de conversão de substrato em biomassa (g.L^{-1})
X_S	Conversão de substrato (%)
R	Rendimento em etanol (%)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1	MEL - CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E APLICAÇÕES.....	15
3.1.1	Características.....	15
3.1.2	Produção.....	16
3.1.3	Aplicações.....	18
3.2	HIDROMEL – HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO, LEGISLAÇÃO.....	19
3.2.1	Histórico.....	19
3.2.2	Características.....	20
3.2.3	Produção.....	21
3.2.4	Legislação.....	22
3.3	ESTEQUIOMETRIA DA REAÇÃO E PARÂMETROS CINÉTICOS DA FERMENTAÇÃO DE GLICOSE A ETANOL.....	23
3.4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS FERMENTATIVOS.....	26
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.6	ESTADO DA ARTE.....	32
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO.....	34
4.2	ORGANIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES, APLICANDO O ALGORITMO DA ENGENHARIA DAS REAÇÕES QUÍMICAS.....	37
4.3	DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS APLICANDO O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
4.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
6	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O mel é definido como um produto proveniente das abelhas que pode ser obtido através do néctar das flores (mel floral), de excreções de insetos sugadores de partes vivas das plantas ou de secreções de partes vivas das plantas (mel de melato) (MATSUO; STEFFEN, 2018).

Possui em sua constituição vários açúcares, além de outros componentes como ácidos orgânicos, enzimas e partículas sólidas coletadas pelas abelhas e é considerado o produto apícola com maior facilidade de ser explorado, sendo também o mais popular e com maior probabilidade de comercialização. Além disso, é um alimento rico e de elevado valor energético, bastante utilizado na indústria farmacêutica e cosmética, devido às suas propriedades terapêuticas, antimicrobiana, regenerativa, calmante, curativa, dentre outras (SILVA et al, 2008).

Diversos produtos podem ser obtidos através do mel, dentre esses existem alguns fermentados alcoólicos, como por exemplo o hidromel, também conhecido como vinho de mel. O hidromel é uma bebida com um teor alcoólico que pode variar entre 8-18%, sendo resultante da fermentação de mel diluído em água, e pode ser classificado em seco, semi-doce e doce (GOMES, 2010). A bebida é considerada a mais antiga conhecida pelo homem, e era bastante consumida na antiguidade, historicamente é conhecida como a bebida dos deuses.

Atualmente o hidromel é produzido em pequena escala e de forma artesanal, sendo grande parte dos produtores os apicultores. Desta forma, a bebida vem sendo uma alternativa para agregar valor ao mel e elevar os lucros desses produtores, se tornando uma fonte de renda extra.

Em processos fermentativos, como é o utilizado para a obtenção do hidromel, é de grande importância o conhecimento da cinética, para o entendimento das conversões que ocorrem, além da avaliação das taxas de crescimento celular, de consumo do substrato e de geração de produtos.

A modelagem matemática pode ser aplicada para prever o comportamento de um processo e as respostas do sistema a alterações nas variáveis mais importantes, proporcionando a melhoria do mesmo (ZANARDI; COSTA, 2015). Na literatura, os modelos mais utilizados para descrever o processo fermentativo são o não estruturado e o não segregado. Uma das etapas na formulação para processos fermentativos é estimar os parâmetros cinéticos, que podem ter valores iniciais obtidos em experimentos, desenvolvidos em laboratório, ou na consulta à literatura sobre o tema.

Para a otimização desses processos, após a definição do modelo e do ajuste dos

parâmetros cinéticos, o conhecimento relativo ao planejamento experimental pode ser útil para estudar a influência de diversas variáveis sobre respostas, como a conversão de substrato e o rendimento em produto, permitindo a definição das condições que irão proporcionar os melhores resultados em relação a quantidade de produto gerada, de células aplicada e de substrato consumido.

Desse modo, torna-se importante estudar o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam descrever o comportamento cinético do processo fermentativo para a produção de hidromel, uma vez que a aplicação desses permite a simulação, realizada em determinadas condições, para indicar como alcançar melhores resultados, com economia de recursos e maior geração de receitas para os produtores.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo obter um modelo matemático para simular o comportamento cinético do processo fermentativo para a produção de hidromel, em um biorreator operando em batelada, utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento cinético do processo fermentativo simulado por um período de 192 horas, em diferentes condições iniciais que foram definidas no planejamento composto central;
- Avaliar a influência das condições iniciais sobre a conversão de substrato e o rendimento em produto;
- Propor a otimização do processo fermentativo, indicando as condições que podem gerar maior geração de produto com menor consumo de substrato.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 MEL - CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO E APLICAÇÕES

3.1.1 Características

O mel é uma substância viscosa, aromática e açucarada, adquirida a partir do néctar das flores e/ou exsudados sacarificados que as abelhas melíferas produzem. Essa substância apresenta algumas características sensoriais, como aroma, paladar, coloração, viscosidade e propriedades medicinais, que estão diretamente conexas com a fonte de néctar, a qual o ocasionou a sua formação e também com a espécie de abelha que o produziu (ZANIN, 2019).

Segundo Azevedo (2019), o mel possui um valor nutricional exaltante, o qual carrega consigo características antissépticas, antimicrobianas, anticancerígenas e anti-inflamatórias, assim como propriedades de defesas e promovem funções celulares em eritrócitos.

De acordo com Crane (1992) e Burlando & Cornara (2013) *apud* De Novais (2021, p.47):

O mel é um produto apícola utilizado pela humanidade desde a pré-história. Registros arqueológicos desse período apontam vestígios da interação entre nossos ancestrais e as abelhas em diversos locais do planeta, como em pinturas rupestres na África, Austrália, Espanha e Índia, renunciando o que hoje denominamos apicultura (Crane, 1992). Desde o seu uso como uma commodity pelas civilizações romanas, gregas e egípcias, há mais de dois mil anos, até a descoberta de propriedades físico-químicas e biológicas que atraem, também, investimentos da indústria de cosméticos, na atualidade (Burlando & Cornara, 2013), o mel e a sua produção evoluíram e hoje ocupam uma posição de destaque no cenário econômico mundial.

Para Ludwig (2020), é considerado um dos alimentos mais antigos e que possui características adoçantes, tendo sua utilização durante os anos para fins alimentícios, na produção de medicamentos (propriedades antissépticas), como conservante de frutas e grãos, e até mesmo como oferenda aos deuses. O alimento é composto essencialmente de carboidratos, que têm como principal função servir como fonte de energia nutricional. No mel os carboidratos presentes em maior quantidade são a frutose e a glicose, que são provenientes da hidrólise enzimática da sacarose adquirida a partir do néctar da vegetação.

Em sua composição também estão presentes a água, proteínas, aminoácidos, enzimas, ácidos orgânicos, vitaminas e sais minerais (ALBUQUERQUE; SOBRINHO; LINS, 2021). Segundo Borges (2021), o mel possui valor energético além de apresentar diversas propriedades biológicas associadas.

O mel possui características de coloração que são provenientes das flores, variam de aproximadamente incolor até marrom escuro, possuindo um sabor (características que podem ir do doce suave ao doce forte, e até mesmo exibir sabor ácido ou amargo) e aroma que variam dependendo da sua origem, e também, podendo ser um fluido viscoso ou sólido (AZEVEDO, 2019).

A composição química exata de qualquer tipo de mel depende, sobretudo, das fontes vegetais das quais é derivado, mas também do solo, clima e da espécie de abelha que o produz (BORGES, 2021).

Segundo Ludwig (2020), o mel é derivado das abelhas e algumas vespas, por meio disso, a abelha *Apis mellifera L.* é a espécie principal produtora do mel, frequentemente utilizado para consumo humano (apesar da grande diversidade de espécies de abelhas existentes e que produzem mel de boa qualidade).

3.1.2 Produção

Em 2019, a produção de mel no Brasil foi de quase 46 mil toneladas, um aumento de 8,5% comparado ao ano anterior. A região Sul do país segue correspondendo ao maior volume de mel produzido, no entanto, a produção apícola no Nordeste teve um crescimento considerável. A produção nordestina em 2019 foi de 15,76 mil toneladas, quantidade 10% maior ao total alcançado no ano anterior. O aumento no volume de chuvas acabou resultando em boas floradas e, em decorrência disso, houve um aumento no volume da produção. (VIDAL, 2021). No ano de 2018 alguns estados da região como o Maranhão, Piauí e a Bahia excederam a produção alcançada em 2011, enquanto os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco tiveram dificuldades de se restabelecer. Observando a produção regional percebe-se que a apicultura já havia apresentado em 2018 um aumento médio de 13,54% a.a. (VIDAL, 2020).

Até pouco tempo o Nordeste não era conhecido pela sua produção de mel, mas, atualmente é considerada uma região de grande potencial para a produção apícola, com cerca de 33% da participação na produção nacional, assim sendo, a apicultura tem se tornado uma boa alternativa para geração de trabalho e renda, e também uma das atividades que mais proporciona a inclusão social do agricultor, principalmente o pequeno produtor (GOMES et al., 2017).

No estado da Paraíba, apesar da elevação da estiagem nos últimos anos, a apicultura vem crescendo significativamente, o conhecimento de itens de ordem organizacional, social e

produtiva se tornam fundamentais para representar a sustentabilidade na produção apícola (DA SILVA, 2017).

Ainda, de acordo com o IBGE, no ano de 2017 a produção de mel chegou a 157 toneladas, fazendo o estado ocupar a 5ª posição de maior produtor da região Nordeste. Entretanto, alguns obstáculos como a escassez de cursos de formação e a não eficiência dos indicadores de qualidade, dificultam a comercialização do mel, tanto no mercado interno como externo (SILVA et al., 2020).

A produção de mel e seus derivados nesse estado nordestino, é fruto do trabalho de pequenos produtores, que geralmente usam técnicas básicas e mão de obra familiar. Esses produtores encontram-se difundidos por diversos municípios do estado, aqueles com resultados superiores, são os que conseguiram se instituir em cooperativas e associações de produtores. Aproximadamente 600 apicultores estão distribuídos em todas as regiões geográficas, e encontram-se, recebendo estímulos por atuações governamentais, que se dá por meio de incentivos fiscais ou edificações para armazenamento do mel e seus derivados.

O governo estadual da Paraíba tem apoiado o desenvolvimento do setor e com investimentos já realizados, proporcionou a fundação de pelo menos 26 unidades de extração de mel e quatro unidades de beneficiamento do produto fabricado (DE SOUSA, 2019).

As condições climáticas e ambientais do estado são propícias para a produção apícola, além de se destacar no mercado nacional com eminente crescimento e inserção de vantagens econômicas, ambientais e sociais. A implantação da atividade apícola no estado é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de pequenas e médias unidades rurais.

A apicultura pode ser considerada uma atividade economicamente viável, socialmente justa e ecologicamente correta, visto que proporciona o aproveitamento do potencial natural do meio ambiente e a sua habilidade produtiva. Assim sendo, a apicultura é vista como uma das grandes opções para a agricultura familiar por possibilitar renda extra ou o aumento da renda (SANTOS, 2019).

A apicultura na mesorregião do Agreste Paraibano tem alcançado posição de destaque por se estabelecer como uma atividade de importância socioeconômica consideravelmente em potencial. Pode ser definida como uma atividade produzida de forma secundária e de base familiar, através de moderados apiários fixos, e coordenados por pequenos produtores rurais. Percebe-se uma resistente tendência ao associativismo em virtude da existência da Cooperativa Regional dos Produtores Rurais (COAPRODES) que produz e comercializa os produtos dos agricultores familiares junto a órgãos governamentais. Na cidade de Pirpirituba existe a Apismel, que se trata de uma associação que objetiva incluir os apicultores do município de

Pirpirituba e região. Entretanto, observa-se a carência de melhorias quanto aos aspectos de padronização e produtividade do produto (SANTOS, 2017).

No município de São José do Cordeiros, localizado no Cariri Ocidental Paraibano, existe a Associação de Apicultores e Meliponicultores – AAME-SJE que surgiu com o intuito de melhorar a realidade socioeconômica do município, e atualmente a apicultura tem sido um elemento importante, destacando-se como atividade principal. Com isso, o governo local tem buscado aperfeiçoar ainda mais essa prática, especialmente pela criação do Festival do Mel, que se tornou uma das maiores festividades da apicultura no Brasil, contando com uma ampla programação técnica, compostas por palestras, oficinas, o Seminário de Integração da Cadeia Produtiva da Apicultura e Meliponicultura, feiras com produtos derivados e que ajuda a promover o progresso econômico do município.

Os consultores e técnicos que atuam com os grupos de apicultores reconheceram como grande o potencial da região e assim tem a apicultura como atividade principal. É uma atividade sustentável, que trabalha o social e o econômico. Por essa razão existe o envolvimento de vários profissionais na apicultura, para garantir que o produtor e consumidor possam ter sustento e alimento, sem causar danos ao meio ambiente (RAMOS, 2018).

3.1.3 Aplicações

O mel é um alimento consumido desde a antiguidade para diversos fins, dentre eles, como agente terapêutico. Os méis florais e os méis de melato são apontados como alimentos com grande potencial bioativo. Porém, o mel de melato tem sido ressaltado por conter minerais, compostos fenólicos, aminoácidos, e outros compostos com potencial bioativo, em quantidades comumente maiores as encontradas em méis florais. Outras características biológicas também são notadas como antioxidante, antimicrobiana e anti-inflamatória. Sendo assim, os méis de melato tem despertado o interesse do mercado consumidor em todo o mundo (PIOVESAN, 2021).

De acordo com De Queiroz Rolim (2018), devido a essa variedade de compostos essenciais, o mel é visto como um produto natural com inúmeras aplicações tanto funcionais como terapêuticas. Atualmente, o alimento está relacionado com efeito curativo, cicatrizante, hidratante, anti-inflamatório, energético, anticancerígeno, antibacteriano e conservante.

Além de ser utilizado como adoçante natural e na gastronomia, o mel também vem sendo empregue para fins cosméticos desde o Egito antigo. Outras potencialidades são o efeito instantâneo de hidratação, tonificação e maciez da pele, além de proporcionar benefícios para o cabelo e couro cabeludo.

Existe controvérsias entre os cientistas sobre o uso terapêutico do mel. Entretanto, é extensa a lista de efeitos benéficos relacionados ao produto proveniente das abelhas.

Acredita-se que o mel pode ajudar no tratamento de úlceras, queimaduras e ferimentos, devido a sua ação antimicrobiana. Possui também resultados positivos sobre a nutrição, contribuindo para a captação de cálcio, a digestão de alimentos e o acúmulo de magnésio, além de proporcionar aumento do apetite. É considerado laxante, eleva o teor de hemoglobina no sangue e a vitalidade muscular. É importante compreender que o mel não é remédio, mas é um alimento saudável e nutritivo, que possui propriedades capazes de auxiliar na saúde e bem-estar (A.B.E.L.H.A., 2020).

Existem inúmeras aplicações e produtos que podem ser obtidos a partir dos diversos tipos de méis, e o hidromel é um produto definido como uma bebida alcoólica fermentada que tem como principal matéria prima o mel. Observando as propriedades da produção do mel e o valor inferior recebido pelos produtores, o hidromel surge como uma alternativa rentável para os apicultores brasileiros, sendo capaz de ampliar os lucros e agregar valor ao mel com a produção da bebida, além disso, também é possível utilizar na produção resquícios de mel com baixo valor comercial que não seriam viáveis para a comercialização como um mel puro (JÚNIOR; et al., 2020).

A produção do hidromel é vista como uma das alternativas para valorizar a região e elevar os ganhos dos apicultores que reúnem recursos para a obtenção de um mel tipicamente aromático, saboroso e único (DA SILVA SANTOS; et al., 2021). A utilização de méis como Blend para a fabricação de novos produtos incrementa a produção, visto que amplia a oferta da matéria prima (DIREITO; et al., 2018).

Nesse contexto, por ser uma bebida produzida artesanalmente e em pequena escala, a produção do hidromel, por meio de um processo fermentativo, realizado de forma única, se tornou uma atividade bastante comum entre os apicultores. A produção ocorre informalmente, com o intuito de complementar a produção de mel, além de ser uma alternativa de renda (DA SILVA SANTOS; et al., 2021).

3.2 HIDROMEL – HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO, LEGISLAÇÃO

3.2.1 Histórico

O hidromel é considerado a bebida alcoólica mais antiga conhecida pela humanidade, sendo historicamente apontada como a bebida dos deuses, obtida basicamente da fermentação do mel com água, levedura e sais nutrientes. Acredita-se que sua produção começou muito

antes que o vinho e a cerveja (RIBEIRO, 2017). De acordo com Schwarz (2019), o hidromel era bastante consumido nos tempos antigos. Na Grécia antiga o hidromel, também conhecido como vinho de mel, era chamado de "melikatron" e era conhecido pelos romanos como "água muisum" (JÚNIOR; CANAVER; BASSAN, 2017).

Na mitologia nórdica a bebida era bastante apreciada, para as civilizações antigas como os celtas, anglo-saxões e vikings, o hidromel fazia parte dos rituais, por ser vista como a bebida dos nobres e deuses. Para essas culturas, o hidromel propiciava a imortalidade, aprendizado e dom da poesia, além de possuir poderes sobrenaturais e de cura, capazes de aumentar a força, virilidade e fertilidade (BATISTA, 2017).

Nos últimos anos, a fabricação de hidromel voltou a crescer, particularmente nos Estados Unidos da América, e essa elevação tem sido incentivada devido ao aumento da cultura geek, na qual fãs de festivais medievais e da mitologia nórdica contemplam o consumo da bebida (NAKADA; CACIATORI; PANDOLFI, 2020).

De acordo com Batista (2017), atualmente a bebida é conhecida por aparecer em seriados de televisão como Vikings, Ragnarok, Game of Thrones, e também em filmes como Harry Potter. Hoje em dia o hidromel é bastante valorizado no mercado internacional e é consumido na Inglaterra, Polônia, Alemanha, Eslovênia e países africanos. O mercado brasileiro tem mostrado grande potencial de crescimento, tendo essencialmente como consumidores homens e mulheres com idade acima de 20 anos. O mercado está concentrado principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil e grande parte das empresas e produtores artesanais da bebida encontram-se em São Paulo e Curitiba (NAKADA; CACIATORI; PANDOLFI, 2020).

3.2.2 Características

O hidromel é uma bebida alcoólica, proveniente da fermentação do mel diluído em água, com teor alcoólico entre 0,8 e 18%, caracteriza-se por ser uma bebida nutritiva, contendo diversos elementos fundamentais para o organismo, resultando em efeitos positivos para o metabolismo e digestão. A bebida caracteriza-se em maioria pelo açúcar presente no mel, mas também pode conter frutas e especiarias (NAKADA; CACIATORI; PANDOLFI, 2020).

O hidromel tradicional pode ser definido pelos seguintes estilos: hidromel seco, semi-doce e doce, podendo apresentar características de mel silvestre, onde o mel não resulta de uma flor específica ou de combinação de méis como o da flor de laranjeira ou eucalipto. Ainda podem ser produzidos com um único tipo específico de mel, caracterizando-se como varietal, e

mesmo que seja assemelhado com cervejas, o hidromel tem uma composição muito mais semelhante com o vinho. O estilo seco é bastante parecido com o vinho branco seco, por possuir uma nuance de mel e gostos frutados agradáveis.

A complexidade dos sabores e o equilíbrio com o qual eles se apresentam são necessários nesse tipo de hidromel e a sua coloração deve ser consistente assim como o aroma. O estilo semi-doce tem uma harmonia semelhante e intensidade de sabor como um vinho branco semi-seco, o gosto de mel, entretanto é mais expresso do que no hidromel seco, tornando-se assim um produto com sabor distinto de qualquer outra variação. Já o hidromel doce tem uma combinação característica de mel, leve dulçor, ésteres frutados delicados e álcool. Profundidade, combinação e equilíbrio dos componentes palpáveis são características desejáveis, para uma bebida sem imprecisão de cor, aroma e sabor (NAKADA; CACIATORI; PANDOLFI, 2020).

3.2.3 Produção

A produção de hidromel compõe-se de poucas etapas, sendo elas: a preparação do mosto, fermentação, estabilização e envase. Mas, dependendo das técnicas utilizadas pelos produtores, pode acontecer uma variação na quantidade de etapas, como a descuba, maturação, trasfega, clarificação e pasteurização. Essas são etapas comumente utilizadas na produção de vinhos (CASTRO, 2021).

Na elaboração do hidromel, as proporções de diluição (mel:água) mais comuns são 1:0,5; 1:1; 1:2; 1:3. As concentrações (1:0,5 e 1:1) com maiores quantidades de açúcar podem acarretar a inibição do levedo alcoólico, em consequência da pressão osmótica excedente, sendo assim, é preciso fracionar a quantidade de mel ao longo do processo fermentativo (BATISTA, 2017).

O hidromel é produzido artesanalmente em pequena escala, geralmente por apicultores. A produção dessa bebida ainda não atrai o interesse comercial da indústria brasileira de bebidas. Além da produção básica, no mosto, pode haver a adição de ervas e/ou frutas, elaborando assim bebidas fermentadas com diferentes colorações e sabores (DE OLIVEIRA, 2020).

Pesquisas vêm sendo realizadas para averiguar a influência do acréscimo de frutas na estrutura química e nas características do hidromel. A aplicação de frutas nativas brasileiras tem sido uma possibilidade de diferenciar a produção de hidromel e agregar valor a matérias-primas pouco exploradas. A linhagem de levedura do gênero *Saccharomyces* empregada na produção de hidromel frequentemente são as culturas starters utilizadas na produção de vinhos, espumantes e cervejas. A taxa de fermentação da bebida depende, principalmente, da qualidade

do mel, da cepa da levedura, formação do mosto e do pH extracelular. Em razão do elevado teor de açúcares fermentáveis, o processo fermentativo é considerado lento. O mel apresenta uma escassez em nitrogênio e aspectos de crescimento necessários para a levedura ser estimulada. Sendo assim, a estrutura química do hidromel não depende apenas da composição do mel utilizado como matéria-prima, mas também depende da variedade de ingredientes que podem ser adicionados ao mosto (WANDERLEY, *et al*, 2020).

3.2.4 Legislação

De acordo com a legislação brasileira, o hidromel é estabelecido como uma bebida com teor alcoólico de 4 a 14% em volume, a 20°C, gerada pela fermentação alcoólica de uma diluição de mel de abelha, sais minerais e água potável (BRASIL, 2009).

Os parâmetros de identidade e qualidade do hidromel estão prescritos na Instrução Normativa nº 34 de 29 de novembro de 2012. Esse regulamento classifica o hidromel em suave ou seco, conforme a quantidade de açúcar. Essa Instrução determina também os padrões legais para o hidromel referentes a acidez total, acidez fixa, acidez volátil, cinzas, anidrido sulfuroso, cloretos totais, extrato seco reduzido, teor de açúcar e graduação alcoólica (BRASIL, 2012). Todos as quantidades permitidas, conforme a norma vigente, encontram-se disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1 - Padrões de identidade e qualidade para o hidromel

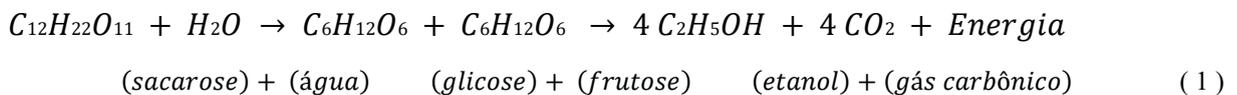
Parâmetros	Limite mínimo	Limite máximo	Classificação
Acidez fixa, em mEq/L	30
Acidez total, em mEq/L	50	130	...
Acidez volátil, em mEq/L	...	20	...
Anidrido sulfuroso total, em g.L ⁻¹	...	0,35	...
Cinzas, g.L ⁻¹	1,5
Cloretos totais, em g.L ⁻¹	...	0,5	...
Graduação alcoólica, em % v/v a 20°C	4	14	...
Extrato seco reduzido, g.L ⁻¹	7
Teor de açúcar, em g.L ⁻¹	...	≤ 3	Seco
	> 3	...	Suave

Fonte: Instrução normativa nº 34, de 29 de novembro de 2012

Além disso, como descrito no tópico anterior, o hidromel pode ser especificado pelo seu dulçor como seco, meio doce e doce, de acordo com a tecnologia usada em seu processo de fabricação e a quantidade de açúcar residual na bebida. Também pode ser especificado quanto a carbonatação, variando do natural (sem carbonatação), levemente carbonatado e espumante. Ainda podem ser especificados conforme sua força, forte ou suave, sendo definido de acordo com sua graduação alcoólica. Essas especificações podem alterar de acordo com o tempo de fermentação, qualidade e quantidade de mel usado na diluição, seleção da levedura, açúcares concentrados e do teor alcoólico (CASTRO, 2021).

3.3 ESTEQUIOMETRIA DA REAÇÃO E PARÂMETROS CINÉTICOS DA FERMENTAÇÃO DE GLICOSE A ETANOL

A fermentação alcoólica pode ser representada pela equação química (1):



Observando a reação global do processo fermentativo, e conhecendo as massas moleculares da sacarose (342,5 g/mol), da glicose (180,156 g/mol), do etanol (46,07 g/mol) e a densidade do etanol (0,788 g/ml), podem ser realizados os cálculos estequiométricos, uma vez que:

- 1 mol g de glicose pode gerar 2 mols de etanol
- 180,56 g de glicose pode gerar 92,14 gramas de etanol

Com isso, sabe-se que para 1 g de glicose, podem ser gerados 0,511 gramas de etanol. Para determinar a quantidade de etanol em mL pode ser utilizada a seguinte relação:

$$0,511 \text{ g de etanol/g de glicose} \times 1 \text{ mL de etanol/0,7895 g de etanol}$$

Com isso, é possível concluir que 1 g de glicose pode gerar 0,647 mL de etanol. Utilizando o mesmo procedimento é possível inferir também que 1g de sacarose gera 0,682 mL de etanol.

A partir da estequiometria da reação, e conhecendo-se a densidade do etanol, é possível determinar também a concentração de etanol máxima teórica (Q_t). Com os dados coletados

durante experimentos, pode-se determinar a concentração de etanol experimental (Q_e). Os resultados, expressos em (g.L^{-1}), podem ser calculados com a utilização das Equações (2) e (3):

$$Q_t = \frac{\text{g de sacarose}}{\text{L de mosto}} \times 0,682 \frac{\text{mL de etanol}}{\text{g de sacarose}} \times 0,789 \frac{\text{g de etanol}}{\text{mL de etanol}} \quad (2)$$

$$Q_e = \frac{\text{mL de etanol}}{100 \text{ mL de mosto}} \times 0,789 \frac{\text{g de etanol}}{\text{mL de etanol}} \times \frac{1000 \text{ mL de mosto}}{1 \text{ L de mosto}} \quad (3)$$

Para determinar o rendimento (R) e a produtividade (P) podem ser utilizadas as Equações (4) e (5), respectivamente. O rendimento é expresso em (%) e a produtividade em ($\text{g.L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

$$R(\%) = \frac{Q_e}{Q_t} \times 100 \quad (4)$$

$$P(\text{g.L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = \frac{Q_e}{t} \quad (5)$$

Em que:

Q_e = concentração (g.L^{-1}) de etanol experimental;

Q_t = concentração (g.L^{-1}) de etanol máxima teórica (estequiométrica);

t = tempo de fermentação (h).

A conversão de substrato pode ser definida como a razão entre a quantidade consumida e a que estava presente no início da fermentação.

Segundo Dantas (2016) o conhecimento da cinética dos processos é primordial para a compreensão das conversões que ocorrem durante a fermentação, e tem a finalidade de quantificar a taxa de crescimento celular, de consumo do substrato e geração de produtos. A taxa de fermentação muda frequentemente conforme o substrato é consumido e o produto é gerado, tornando a cinética de fermentação alcoólica um assunto complexo. Para descrever esse processo fermentativo, o tipo de modelo mais relatado na literatura é o não estruturado e o não segregado. O estudo da cinética dos processos fermentativos tem duas grandes finalidades: (1)

averiguar as velocidades das transformações que acontecem durante o processo e (2) entender a ação de fatores nas velocidades das transformações; dessa forma, a cinética dos processos fermentativos proporciona a compressão das condições mais favoráveis para regular e controlar um processo fermentativo.

A cinética de biotransformação está associada com a velocidade de consumo do substrato e do surgimento de produto e em casos mais específicos de processos de fermentação usando leveduras, também se associa com a velocidade de crescimento celular e a consequência causada pela influência das condições no meio em processo. É bastante significativo o estudo de um processo de biotransformação, pois, atribui a aprendizagem básica do processo (DANTAS, 2016).

De acordo com Rosa (2017) na determinação dos parâmetros cinéticos da fermentação alcoólica pode-se calcular o rendimento em produto dado por ($Y_{P/S}$), que está associado a massa de produto gerado (etanol) com a massa de substrato consumida (açúcar), sendo definido pela Equação (6):

$$Y_{P/S} = \frac{C_P - C_{P0}}{C_{S0} - C_S} \quad (6)$$

Em que:

C_S = concentração final de substrato (g.L^{-1});

C_{S0} = concentração inicial de substrato (g.L^{-1});

C_P = concentração final de produto (g.L^{-1});

C_{P0} = concentração inicial de produto (g.L^{-1});

$Y_{P/S}$ = (rendimento em produto) = quantidade de produto formado em relação à quantidade substrato limitante consumido.

Para o fator de conversão do substrato em biomassa ($Y_{X/S}$) que expressa a quantidade de massa celular formada em base seca com quantidade de substrato consumido (g de açúcar), é definido pela Equação (7):

$$Y_{C/S} = \frac{C_C - C_{C0}}{C_{S0} - C_S} \quad (7)$$

Em que:

C_S = concentração final de substrato (g.L^{-1});

C_{s0} = concentração inicial de substrato (g.L^{-1});

C_C = concentração celular final (g.L^{-1});

C_{C0} = concentração celular inicial (g.L^{-1});

$Y_{C/S}$ = (fator de conversão de substrato em biomassa) = quantidade de massa celular produzida por grama de açúcar consumido.

Além desses parâmetros, é possível calcular também a eficiência (%), (FARIAS, 2019). O cálculo de eficiência da fermentação é um parâmetro fundamental para avaliar o desenvolvimento do processo produtivo do etanol, e é bastante utilizado pelo setor industrial (PEREIRA, 2019). A eficiência da fermentação representa a produção de etanol de acordo com o teor de açúcares redutores estabelecidos no mosto, que define a eficiência do microrganismo na conversão de ART (Açúcares Redutores Totais) em etanol (FARIAS, 2019). O cálculo pode ser realizado aplicando a Equação (8):

$$E (\%) = \frac{Y_{P/S}}{0,511} * 100 \quad (8)$$

Em que:

$Y_{P/S}$: rendimento da fermentação é dado pela quantidade de etanol gerado por unidade de açúcar consumido;

Em que 0,511 está associado a estequiometria de conversão da glicose em etanol (BARROS, 2021).

3.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS FERMENTATIVOS

Para Costa (2019) a modelagem matemática é o campo de conhecimento voltado para diversas formas de desenvolver e transformar modelos matemáticos em sistemas reais e vice-versa. Em processos fermentativos, a modelagem matemática, pode ser determinada como uma tentativa de reproduzir, por meio de equações matemáticas, os balanços de massa para cada elemento dos biorreatores, ligados às transformações bioquímicas complexas que decorrem no processo e as velocidades com que tais transformações ocorrem.

Obtendo-se o modelo matemático, é fundamental que ocorra uma constatação do comportamento correto correspondente das equações perante a perspectiva real do sistema (CASTRO; BOSCH, 2021).

Os bioprocessos participam de inúmeros processos industriais, integrando a produção

de alimentos, ácidos orgânicos, antibióticos, aminoácidos e etanol. Além de serem usados também no tratamento de águas residuais. As reações que envolvem bioprocessos são comumente executadas em biorreatores, envolvendo o consumo de substrato, geração de produto e aumento do microrganismo responsável pelo bioprocessos. Conseqüentemente a modelagem de biorreatores é uma fase importante na análise de processos bioquímicos. Diversos modelos matemáticos estão disponíveis na bibliografia para representar as taxas de crescimento celular, com e sem substrato, assim como a inibição do produto e/ou celular e pode ser utilizado na modelagem e simulação de bioprocessos (OLIVEIRA, et al., 2017).

De acordo com Braga (2021) os modelos cinéticos são um dos elementos essenciais dos mecanismos empregados para a simulação de bioprocessos, visto que eles são encarregados por determinar o perfil de crescimento das células no ambiente fermentativo. Esses modelos levam em consideração inúmeras situações de operação do sistema, o que certifica maior confiabilidade nas informações resultantes das simulações dos processos.

Os modelos cinéticos de crescimento celular são equações matemáticas recomendadas para reproduzir, particularmente a velocidade específica de crescimento celular, que procuram detalhar como ocorre esse crescimento. Nesses modelos leva-se em consideração as alterações na concentração de um substrato limitante, visto que interfere diretamente no progresso do bioprocessos, logo, as equações ou modelos são funções do substrato limitante. Na bibliografia há diversos tipos de modelos cinéticos de crescimento celular que estimam uma população homogênea de células, em que mostram uma composição média. Esses modelos conseguem ser divididos em modelos que apresentam inibição pelo substrato, pelo produto ou pelas próprias células (quando apresentam altas concentrações) e ainda em modelos que não consideram inibição por nenhum desses elementos (BRAGA, 2021).

A modelagem da fermentação alcoólica representa, a partir das equações matemáticas, o desempenho do processo fermentativo. A utilização desses modelos possibilita, através da simulação a análise das ações entre parâmetros e variáveis. Além do mais possibilita uma melhor compreensão do processo, tornando-se proficiente para as etapas de otimização e controle da fermentação (VELOSO, 2019).

A velocidade específica de crescimento (μ) é representada por modelos cinéticos desenvolvidos por equações matemáticas em função da concentração de substrato limitante (C_s). Além de C_s , outros modelos são achados na bibliografia em função da concentração celular (C_c) e da concentração de produto (C_p). Os modelos cinéticos são comumente empregados para evidenciar o crescimento celular na fermentação alcoólica, e podem ser considerados quanto ao número de elementos utilizados na representação celular (modelos

estruturados e não estruturados) e quanto a sua heterogeneidade da população microbiana (modelos segregados e não segregados), como podem ser definidos a seguir (VELOSO, 2019):

- **Modelos estruturados:** são modelos onde o microrganismo é representado com mais detalhes, levando em consideração os elementos intracelulares estruturais, que possibilita caracterizar o estado das células e sua adequação ao meio ambiente.
- **Modelos não-estruturados:** a biomassa é definida por uma única variável (número de células ou massa celular), não leva em consideração as variações dos elementos intracelulares na estimativa do comportamento cinético do processo, isto é, esse modelo desconsidera as variações na estrutura celular.
- **Modelos segregados:** são modelos em que a população celular é heterogênea com classificação de idade, tamanho e características celulares.
- **Modelos não-segregados:** modelos onde a população é vista como homogênea, isto é, possuem o mesmo comportamento.

A velocidade de crescimento celular em um processo fermentativo depende de diversos fatores que ocorrem durante o processo. Os modelos podem ser classificados como estruturados ou não estruturados e em segregados e não segregados, conforme o grau de complexidade e empenho computacional necessários (CARNEIRO; BOVOLINI, 2020).

De acordo com Veloso (2019) os modelos segregados e estruturados representam mais minuciosamente o comportamento cinético da fermentação alcoólica em relação aos modelos não estruturados e não-segregados. Entretanto, na maior parte dos casos, a utilização de modelos estruturados e segregados não explica os resultados alcançados devido a sua complexidade. Sendo assim, os modelos não estruturados e não segregados são mais aplicados, visto que sua utilização pode ser dada de forma mais genérica. (CARNEIRO; BOVOLINI, 2020).

Os modelos que representam a conduta dinâmica da fermentação alcoólica consistem na definição da velocidade específica de crescimento (μ). Os modelos cinéticos encontrados na bibliografia podem ser separados em dois grupos: modelos livre de inibição e modelos que levam em consideração a inibição por substrato, células e/ou produto, como apontados a seguir (VELOSO, 2019):

- **Modelos sem inibição**

Modelo de Monod (1942):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S} \quad (9)$$

Em que:

$\mu_{m\acute{a}x}$ é a velocidade específica máxima de crescimento celular (h^{-1});

K_S é a constante de saturação ($g.L^{-1}$);

C_S é a concentração de substrato limitante.

Segundo Carneiro & Bovolini (2020) a equação empírica de Monod é comumente aplicada para constatar a relação entre a taxa específica de crescimento celular e a concentração do substrato limitante (S) no meio.

O modelo de Monod atuou como suporte para outros modelos cinéticos de crescimento sem inibição, no qual destacam-se o modelo de Moser (1958) e o modelo de Contois (1959).

Modelo de Moser (1958):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S^u}{K_S + C_S^u} \quad (10)$$

Em que:

u: é um parâmetro adimensional do modelo.

Modelo de Contois (1959):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S C_C + C_S} \quad (11)$$

Em que:

C_C é a concentração celular ($g.L^{-1}$).

- **Modelos com inibição**

A velocidade específica de crescimento celular (μ) pode ser influenciada por inúmeros fatores. Alguns modelos cinéticos julgam esses fatores como sendo a inibição pelo produto gerado pelas células, pelo substrato limitante ou ainda a inibição celular, quando o acúmulo de células é excedente (VELOSO, 2019). A seguir alguns modelos de inibição:

a) Inibição pelo substrato

- Modelo de Andrews (1968): também chamado de “modelo de Monod com inibição pelo substrato”, destaca-se como o modelo mais aceito para retratar a inibição pelo substrato.

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S + \frac{C_S^2}{K_{IS}}} \quad (12)$$

Em que:

K_{IS} : é a constante de inibição pelo substrato ($g.L^{-1}$)

- Modelo de Wu (1988):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S + \frac{C_S^v}{K_{IS}}} \quad (13)$$

Em que:

v : é um parâmetro adimensional do modelo.

b) Inibição pelo produto

- Modelo de Aiba- Shoda- Nagatani (1968):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S} e^{(-K_P C_P)} \quad (14)$$

Em que:

K_P : é a constante de inibição pelo produto ($g.L^{-1}$)

- Modelo de Levenspiel (1980):

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S} * \left(1 - \frac{C_P}{C_P^*}\right)^n \quad (15)$$

Em que:

n : é um parâmetro adimensional do modelo e C_P^* é a concentração crítica de produto a partir

da qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1}). Para a fermentação de glicose a etanol, os valores típicos são $n = 0,5$ e $C_p^* = 93 \text{ g.L}^{-1}$ (FOGLER, 2016).

- Modelo de Hoppe- Hansford (1982):

$$\mu = \mu_{\text{máx}} \frac{C_s}{K_s + C_s} * \frac{K_{IP}}{K_{IP} + C_P} \quad (16)$$

Em que:

K_{IP} é a constante de inibição pelo produto (g.L^{-1}).

- c) Inibição celular

- Modelo de Lee- Pollard- Coulman (1983):

$$\mu = \mu_{\text{máx}} \frac{C_s}{K_s + C_s} * \left(1 - \frac{C_X}{C_{X^*}}\right)^m \quad (17)$$

Em que:

m : é um parâmetro adimensional do modelo e C_{X^*} é a concentração crítica de células a partir da qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1}).

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O termo planejamento experimental, ou também chamado de planejamento fatorial, pode ser determinado como um grupo de ensaios definidos com critérios científicos e estatísticos, é empregado para estabelecer a influência das variáveis estipuladas em um sistema ou processo. Em um planejamento experimental, após a determinação das variáveis com influência superior no processo, obtém-se como resultado a diminuição na variação do processo e maior concordância entre os valores esperados e os valores obtidos, além da redução no tempo e nos custos do processo, e aumento no rendimento (TIERLING, 2016).

Para De Sousa Araújo (2014) a importância da utilização do método de planejamento fatorial em estudos dos quais contém muitas variáveis, como na fermentação alcoólica, é que

permite o planejamento e a realização de forma ordenada, de uma fração mínima fundamental de experimentos e proporciona a economia de tempo e recursos financeiros.

Alguns requisitos devem ser enumerados para que sejam estipulados na organização de um planejamento fatorial, são eles: 1) determinar quais as variáveis que influenciam mais nos resultados; 2) atribuir valores às variáveis significativas visando a otimização dos resultados; 3) atribuir valores a essas variáveis de maneira que minimize a variação dos resultados e a influência de variáveis incontroláveis (TIERLING, 2016).

3.6 ESTADO DA ARTE

O hidromel vem sendo alvo de estudos visando a potencialização e evolução no seu processo de produção (MILAGRES DE ALMEIDA; et al. 2021). Geralmente, as leveduras usadas na fermentação do hidromel, assim como no processo de fermentação de outras bebidas alcoólicas são da espécie *Saccharomyces cerevisiae* (JÚNIOR, 2017).

Deste modo, Brito (2015) estudou e avaliou em seu trabalho dois tipos de levedura *Saccharomyces cerevisiae* para a produção de hidromel, uma sendo industrial (JP1) e a outra comercial (Safbrew T-58). As fermentações ocorreram a uma temperatura de 28-30°C, para a levedura comercial a fermentação durou 9 dias com teor de sólidos solúveis inicial de 30 °Brix e final de 14 °Brix, obtendo um teor alcoólico de 13°GL. Para a levedura industrial a fermentação também ocorreu por 9 dias com teor de sólidos solúveis inicial 30 °Brix e final 17 °Brix, obtendo um teor alcoólico de 16°GL. Os resultados obtidos apontaram que ambas as leveduras são recomendadas para o processo.

Em um estudo sobre o processo fermentativo na produção de hidromel, Milagres de Almeida *et al* (2021) utilizou fermento comercial liofilizado *Saccharomyces cerevisiae*, geralmente utilizado na indústria de panificação, e a *Saccharomyces boulardii*, adquirida em farmácia. O estudo foi conduzido por 2 tratamentos (A com *Saccharomyces cerevisiae* e B *Saccharomyces boulardii*), a fermentação ocorreu durante 16 dias a uma temperatura de 25°C e os valores de sólidos solúveis eram de 20 °Brix no início do processo e de 7,9 °Brix no final, para ambos os tratamentos. Ao final do processo fermentativo os hidroméis produzidos pelo tratamento A (*S. cerevisiae*) apresentou 11,06% (v/v) de álcool e os produzidos pelo tratamento B (*S. boulardii*) apresentam um teor alcoólico de 11,1% (v/v), constatando a eficiência na produção de álcool pelas leveduras em virtude do consumo dos açúcares.

No estudo realizado por Munieweg et al (2016) sobre a produção do hidromel, foi usada a levedura liofilizada *Saccharomyces cerevisiae* comercial para panificação, a produção foi

realizada em temperatura controlada de 28°C (Padrão) e em temperatura ambiente (artesanal), a fermentação foi realizada durante 30 dias, os valores iniciais de SST no hidromel padrão foi de 21,30°Brix e no hidromel artesanal foi de 21,70°Brix. No final da fermentação o hidromel padrão e o artesanal obtiveram um teor de SST de 8,54 e 8,89°Brix, respectivamente, e teor alcoólico de 9,03°GL para o hidromel padrão e de 9,10°GL para o artesanal, afirmando que a temperatura controlada não interferiu na produção do etanol.

Costa (2016) realizou um estudo que consistiu na caracterização de hidromel do tipo tradicional e saborizado com morango, para a fermentação foi utilizada a levedura *Saccharomyces cerevisiae* adequada para a produção de vinhos brancos secos, fabricada pela Lalvin®. O processo fermentativo foi conduzido em batelada, a 19°C por um período de 70 dias. No 49º dia foi realizada a trasfega, e ocorreu a adição do morango no hidromel saborizado. Os mostos de hidromel tradicional e do saborizado apresentavam no início da fermentação um teor de sólidos solúveis de 24,6 e 24°Brix, respectivamente, ao longo do processo esses valores reduziram para 10,9 e 10,2°Brix. Dessa forma, o teor alcoólico observado para os dois tratamentos foi de 6,85 °GL para o hidromel tradicional, e de 6,9 °GL para o hidromel saborizado com morango. O trabalho concluiu que os hidroméis produzidos apresentaram os parâmetros adequados de acordo com a legislação vigente de hidromel.

4 METODOLOGIA

A seguir são descritos os passos que foram seguidos para obtenção dos parâmetros do modelo matemático intrínscio ao processo, não estruturado e não segregado, que representa o comportamento cinético do processo fermentativo para produção do hidromel, utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, levando em consideração os dados apresentados após a realização dos procedimentos experimentais realizados por Brandão, Barroso e Lobato (2018).

4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

- Tipo de reator: Batelada

Considerações:

1. Não existe vazão de entrada ou de saída de material, com isso as vazões de entrada (F_{j0}) e de saída (F_j) são nulas:

$$F_{j0} = F_j = 0 \quad (18)$$

2. Mesmo havendo a retirada de material do interior do biorreator para a caracterização do processo, foi considerado que não ocorreu modificações no estado do processo, pois as massas de todos os componentes (substratos, produtos e células) não são alteradas no momento dessa coleta, e a quantidade utilizada para este fim representa uma porcentagem pequena do valor total, com isso o volume (V) pode ser considerado constante, logo:

$$V_0 = V \quad (19)$$

3. Levou-se em consideração que o processo foi conduzido com mistura perfeita, em que as propriedades não sofrem variação em relação a posição no interior do reator, o que resulta:

$$\int r_j dV = r_j V \quad (20)$$

Com isso, partindo de uma equação geral de balanço molar, como a apresentada a seguir:

$$F_{j0} - F_j + \int r_j dV = \frac{dN_j}{dt}$$

(21)

Foi possível definir a equação de projeto para o reator em batelada, como:

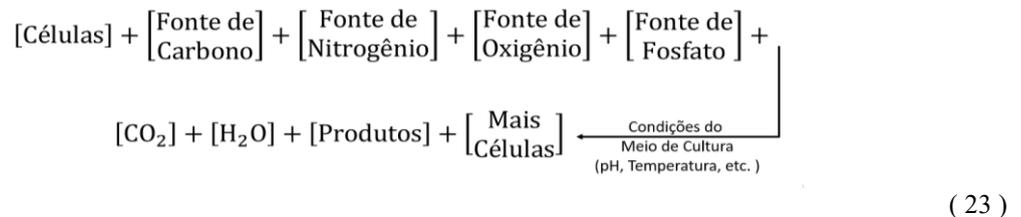
$$\frac{dM_j}{dt} = r_j V \rightarrow \frac{dC_j}{dt} = r_j \quad (22)$$

Em que, M_j é a massa da espécie j , r_j é a velocidade de reação relativa à espécie j , C_j é a concentração em massa/volume da espécie j e V é o volume no meio reacional.

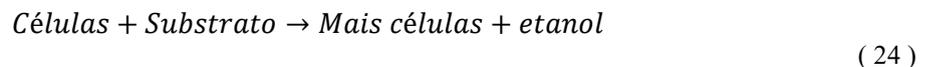
Após a definição das reações que ocorrem no reator, foi necessário desenvolver uma equação de balanço para cada espécie/componente envolvida(o).

- Tipo de reação:
 - Reações

Em geral, o crescimento de um organismo aeróbico segue a equação (23):



As considerações foram as que no interior do reator as principais espécies envolvidas são o substrato (fonte de carbono - glicose), o microrganismo (células – levedura *Saccharomyces cerevisiae*) e os produtos (etanol + células). Com isso, foi possível expressar o processo reacional por meio da seguinte equação química simplificada:



De acordo com as condições de operação e as concentrações envolvidas no processo estudado, foi possível desprezar o consumo de oxigênio e de outros nutrientes, além da formação de gás carbônico e de outros produtos.

- Leis de Velocidade

Considerando que os principais componentes/espécies da reação são as células (C),

substrato (S) e produto (P), foi necessário definir uma equação de lei de velocidade para cada um.

Considerando as células, a lei mais comumente utilizada para expressar a velocidade de crescimento celular, é a equação de Monod para crescimento exponencial, com isso:

$$r_C = \mu \cdot C_C \quad (25)$$

A velocidade específica de crescimento, de acordo com a Lei de Monod, pode ser dada por:

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \cdot \frac{C_S}{K_S + C_S} \quad (26)$$

Em que: μ é a velocidade específica de crescimento, $\mu_{m\acute{a}x}$ é a velocidade específica máxima de crescimento celular, C_S é a concentração de substrato limitante e K_S é a constante de saturação.

Entretanto, em muitos sistemas o produto inibe a velocidade de crescimento, dentre estes o processo de fermentação da glicose para produzir etanol, sendo o microrganismo inibido pelo produto. Existem diferentes equações para descrever a inibição; uma dessas leis de velocidade, proposta por Levenspiel, assume a forma:

$$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \cdot \frac{C_S}{K_S + C_S} \left(1 - \frac{C_P}{C_{P*}}\right)^n \quad (27)$$

Em que: C_P é a concentração de produto, C_{P*} é a concentração crítica de produto a partir da qual cessa o crescimento celular e n é um parâmetro adimensional do modelo.

Como na produção do hidromel o substrato limitante é a glicose e o produto principal é o etanol, a Equação (27) também foi testada.

Levando em consideração que após a fase de crescimento exponencial e estacionária ocorrem a redução da quantidade de substrato, aumento da concentração do produto, que pode ser tóxico, além das forças de cisalhamento, deve-se considerar a velocidade de morte celular, que pode ser representada por:

$$r_d = K_d \cdot C_C \quad (28)$$

Em que: K_d é o parâmetro de morte celular e C_C é a concentração celular.

Neste ponto é importante ressaltar que a velocidade de consumo do substrato, representada pelo termo $-r_S$, é resultado da sua utilização para o crescimento celular, para formação do produto e para manutenção das atividades celulares, sendo expressa pela Equação (29):

$$-r_S = Y_{S/C} \cdot r_C + Y_{S/P} \cdot r_P + mC_C \quad (29)$$

Em que: m é a massa de substrato consumida para manutenção das atividades celulares. Os fatores de conversão de células/substrato ($Y_{C/S}$) e de produto/substrato $Y_{P/S}$, são dados por:

$$Y_{C/S} = \frac{C_C - C_{C0}}{C_{S0} - C_S}, Y_{P/S} = \frac{C_P - C_{P0}}{C_{S0} - C_S} \quad (30)$$

Se produto é formado durante a fase de crescimento, torna-se impossível separar a quantidade de substrato consumido para o crescimento celular da quantidade de substrato consumido para a geração de produto. Com isso, todo o substrato consumido é agrupado em um coeficiente estequiométrico, e a velocidade de consumo de substrato pode ser escrita da seguinte forma:

$$-r_S = Y_{S/C} \cdot r_C + mC_C \quad (31)$$

O termo da velocidade de formação do produto, representado por r_P , pode ser dado por:

$$r_P = r_C \cdot Y_{P/C} \quad (32)$$

4.2 ORGANIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES, APLICANDO O ALGORITMO DA ENGENHARIA DAS REAÇÕES QUÍMICAS

Para o desenvolvimento desta etapa, foram aplicados os passos apresentados em Fogler (2016).

1- Balanços Molares

Inicialmente, a equação estequiométrica foi reescrita na forma simplificada:



C - Células
 S - Substrato
 P - Produto

Em seguida foram escritos um balanço para cada espécie:

$$\frac{dC_C}{dt} = r_C; \frac{dC_S}{dt} = r_S; \frac{dC_P}{dt} = r_P \quad (34)$$

2- Combinando com as leis de velocidade e expandindo a lei de Monod para o crescimento celular, foram obtidas as Equações:

$$\frac{dC_C}{dt} = \mu_{m\acute{a}x} \cdot \frac{C_S}{K_S + C_S} \cdot C_C - K_d \cdot C_C \quad (35)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{C/S}} \cdot \frac{dC_C}{dt} - mC_C \quad (36)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Y_{P/S}}{Y_{C/S}} \cdot \frac{dC_C}{dt} \quad (37)$$

Com isso, foi possível obter o conjunto de equações diferenciais que pôde ser aplicado para descrever o comportamento cinético do processo fermentativo aplicado para produção de hidromel, usando levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

Para a simulação do processo, a partir da resolução do conjunto de Equações (35), (36) e (37), aplicou-se o método de Runge-Kutta-Fehlberg, utilizando-se o *software* Polymath[®]. Foram considerados um tempo de reação de 192 horas, para diferentes condições iniciais.

Além da inserção das equações diferenciais, foram fornecidos os parâmetros relativos à equação de Levenspiel, além dos fatores de conversão. Os passos seguidos foram os seguintes:

1. Definição das condições iniciais de operação, estabelecendo as concentrações iniciais:
 - C_{C0} ; C_{S0} e C_{P0} ;
2. Definição das respostas:

- Produtividade em Etanol
- Quais variáveis serão acompanhadas durante o processo?
 - Concentrações de células, substrato e produto - C_C ; C_S e C_P ;

3. Equações e Parâmetros

Tabela 2 - Equações diferenciais aplicadas na modelagem

Espécie	Balço molar
Células – C	$\frac{dC_C}{dt} = r_C - r_d$
Substrato – S	$\frac{dC_S}{dt} = -r_S$
Produto - P	$\frac{dC_P}{dt} = r_P$

Tabela 3 - Equações explícitas aplicadas na modelagem

Espécie	Concentrações	Leis de Velocidade	Velocidades específicas
Células	C_C	$r_C = \mu \cdot C_C$ $r_d = K_d \cdot C_C$	$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \frac{C_S}{K_S + C_S}$
Substrato	C_S	$r_S = -(Y_{S/C} \cdot r_C + mC_C)$	$\mu = \mu_{m\acute{a}x} \cdot \frac{C_S}{K_S + C_S} \left(1 - \frac{C_P}{C_{P*}}\right)^n$
Produto	C_P	$r_P = r_C \cdot Y_{P/C}$	

Tabela 4 - Parâmetros aplicados na modelagem

Parâmetros de conversão	Constantes
$Y_{C/S}$	$\mu_{m\acute{a}x}$
$Y_{P/S}$	K_S
	C_{P*}
	n

Para estimativa dos parâmetros cinéticos foram aplicados os dados disponíveis em Brandão, Barroso e Lobato (2018), seguindo-se o procedimento descrito em Schmidell et al., (2001).

Inicialmente, realizou-se a construção dos gráficos das concentrações de células, substrato e produto, em função do tempo para que fosse possível identificar as fases do crescimento celular.

Na sequência, para que houvesse a confirmação do período de ocorrência da fase de

crescimento exponencial, onde é observada a velocidade específica máxima de crescimento ($\mu_{m\acute{a}x}$), foi traçado um gráfico do logaritmo natural da concentração de células em função do tempo, ($\ln C_C$) vs. (t), para diferentes limites iniciais e finais, determinando-se, através do melhor coeficiente de correlação, o início e a duração dessa fase, sendo que o coeficiente angular da melhor correlação forneceu o valor de $\mu_{m\acute{a}x}$.

Em seguida, recuperando-se os valores de C_C que satisfizeram a regressão linear escolhida na etapa anterior, aprimorou-se a curva de (C_C) vs. (t) durante a fase exponencial e por fim, foi possível realizar o cálculo das velocidades específicas de crescimento, para a obtenção do parâmetro K_S , permitindo a posterior realização da simulação do processo, visando a sua otimização, a partir da avaliação das condições iniciais do meio.

Após a primeira simulação, para cada modelo avaliado, os valores dos parâmetros foram alterados até o melhor ajuste ser alcançado para variação das concentrações dos constituintes. Na Tabela 5, encontram-se as equações digitadas no Polymath:

Tabela 5 - Estimativa inicial dos parâmetros e equações digitadas no Polymath

Parâmetros	Equações Diferenciais	Equações Explícitas
mimax=0.0154	$d(CC) / d(dt) = rC - rd$	$mi = kobs * (CS / (KS + CS))$
KS=162.88	$CC(0) = 2.39$	$kobs = mimax * (1 - ((CP/Cp)^{0.52}))$
YPS=0.4698	$d(CS) / d(dt) = rS$	$YPC = YPS / YCS$
YCS=0.00262	$CS(0) = 272$	$rC = mi * CC$
YSC=1/YCS	$d(CP) / d(dt) = rP$	$rS = -YSC * rC - YSP * rP - m * CC$
m=0.03	$CP(0) = 0$	$rP = rC * YPC$
Cp=80	$dt(0) = 0$	$rd = kd * CC$
Kd=0,001	$dt(f) = 360$	

Fonte: O Autor (2022).

4.3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS APLICANDO O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

As simulações foram realizadas utilizando-se um planejamento composto central com dois fatores, sendo as variáveis independentes as concentrações iniciais de células (C_{C0}) e de substrato (C_{S0}). Este método é usado como estratégia na utilização de otimização estatística de determinados processos, por tratar-se de um método relativamente simples e eficiente.

Na Tabela 6, encontram-se os valores reais e codificados dos fatores, concentrações

iniciais de células e de substrato, utilizados na simulação do processo a fim de avaliar os efeitos sobre as variáveis dependentes, conversão e rendimento.

Tabela 6 - Níveis reais e codificados das variáveis independentes, concentração de células (C_{C0}) e de substrato (C_{S0}).

Ensaio	Concentração inicial de células (C_{C0})	Concentração inicial de substrato (C_{S0})
1	0,80 (-1,0)	90,00 (-1)
2	0,80 (-1,0)	270,00 (+1)
3	2,40 (+1,0)	90,00 (-1)
4	2,40 (+1,0)	270,00 (+1)
5	0,47 ($-\sqrt{2}$)	180,00 (0,0)
6	2,73 ($+\sqrt{2}$)	180,00 (0,0)
7	1,60 (0,0)	53,00 ($-\sqrt{2}$)
8	1,60 (0,0)	307,00 ($+\sqrt{2}$)
9	1,60 (0,0)	180,00 (0,0)

Fonte: O Autor (2022).

A etapa de simulação, variando as condições iniciais conforme estabelecido no planejamento composto central, possibilitou a geração de dados que permitiram avaliar o comportamento cinético do processo em relação as concentrações de células, substrato e produto, para um período de 192 horas de processo. A análise desse comportamento torna-se mais facilitada quando apresentada em gráficos, que foram construídos utilizando o *software* Origin 8.5®.

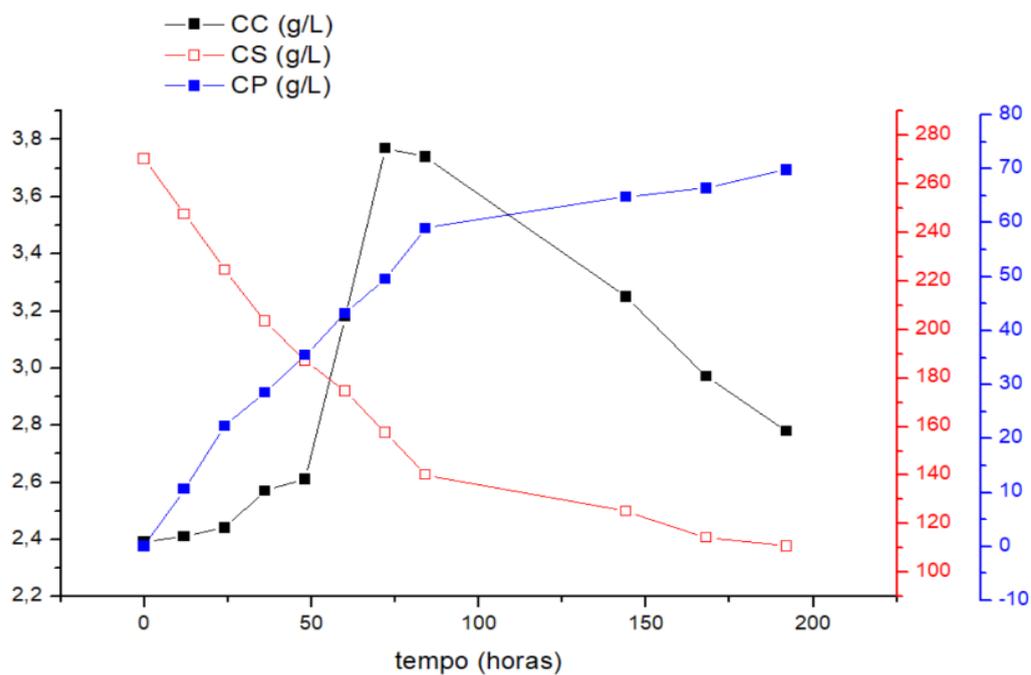
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Para realização da análise estatística dos resultados obtidos, visando propor as condições ótimas para a realização do processo, utilizou-se o *software* Statistica®. Foram construídas superfícies de resposta, para a indicação das condições de operação aplicadas na simulação que podem proporcionar os melhores resultados na geração de produto e consumo de substrato.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados disponíveis em Brandão, Barroso e Lobato (2018) foi possível obter o gráfico que representa a cinética de fermentação em batelada para produção de hidromel utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Os dados estão expressos em termos das concentrações de células (C_C), substrato (C_S) e produto (C_P), em função do tempo de operação em um reator operando em batelada.

Gráfico 1 - Cinética de fermentação para produção de hidromel utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*.



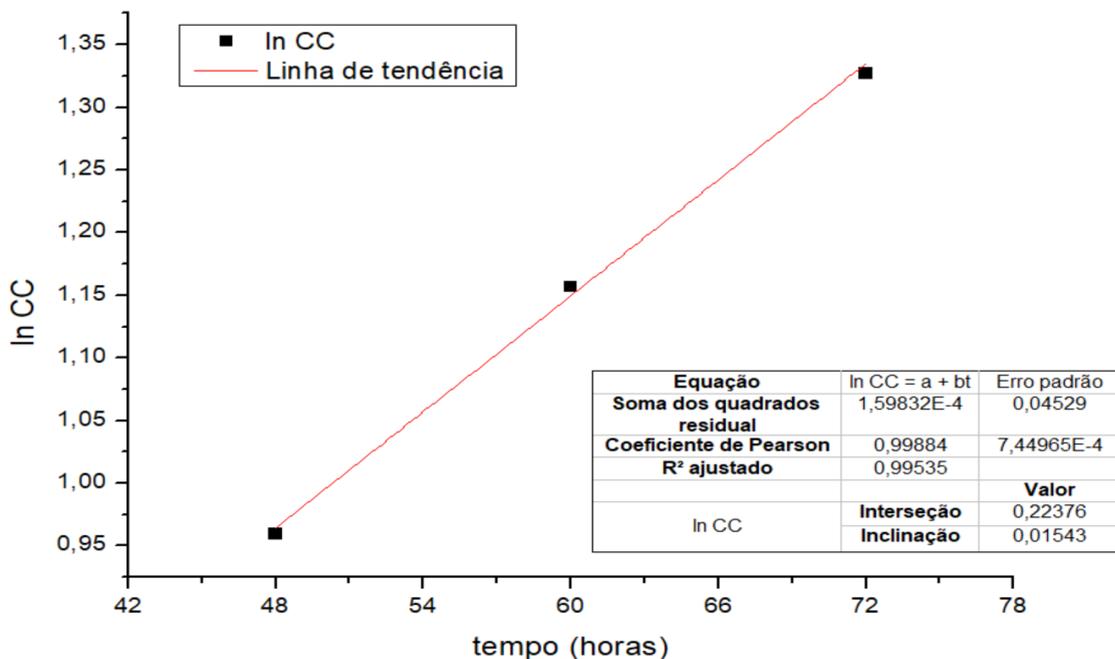
Para a concentração celular (C_C) foi possível verificar a fase exponencial a partir de 48 h, na qual foi possível observar o seu pico em 72 h. Após esse tempo pode-se observar uma diminuição na concentração de células, que pode ser justificada pelo aumento da concentração de produto (C_P) ou pela redução da quantidade de nutrientes do substrato. Em relação a concentração de produto (C_P) e a concentração de substrato (C_S), pode-se observar que enquanto o substrato é consumido ocorre um aumento na quantidade de produto gerado, simultaneamente. As concentrações finais foram $2,78 \text{ g.L}^{-1}$ de células, 110 g.L^{-1} de substrato e $69,80 \text{ g.L}^{-1}$ de etanol.

Convertendo a concentração de etanol para porcentagem (volume/volume), o valor é de aproximadamente 8,8%. Observa-se que sobrou bastante substrato a ser consumido, porém o hidromel produzido estava dentro das normas, enquadrando-se como suave, pois a concentração

de açúcar foi superior a 3 g.L⁻¹, e que os limites para etanol são de 4 e 14%.

Após a identificação dos processos e das fases de crescimento, para confirmar em qual intervalo de tempo ocorreu a fase de crescimento exponencial, em que a velocidade específica de crescimento é máxima ($\mu = \mu_{m\acute{a}x}$), aplicou-se o procedimento descrito no item 4.3 da metodologia, no qual o gráfico de $\ln(C_C)$ em função do tempo que gerou o melhor resultado foi o apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Logaritmo natural da concentração de células em função do tempo

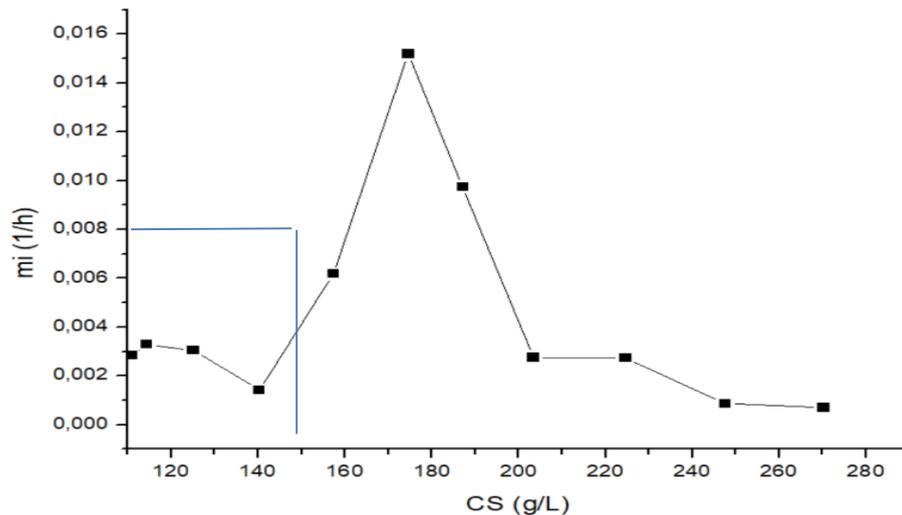


Com isso, a estimativa inicial do parâmetro $\mu_{m\acute{a}x}$ foi de 0,0154 h⁻¹. Utilizando os dados disponíveis no trabalho realizado por Brito (2015), em que foi estudada a cinética do processo fermentativo em batelada para produzir hidromel, utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, foi possível verificar que a velocidade específica máxima estimada foi de 0,0153 h⁻¹. Esse valor pode ser considerado igual ao encontrado no desenvolvimento do presente trabalho. Quando comparadas as condições iniciais de processo, observa-se que no estudo de Brito (2015) foram aplicadas uma concentração de células de 1,5 g.L⁻¹ e concentração de substrato de 305 g.L⁻¹, valores próximos aos aplicados por Brandão, Barroso e Lobato (2018), 2,39 g.L⁻¹ e 270 g.L⁻¹, respectivamente, o que pode explicar a igualdade dos valores, uma vez que a levedura e o substrato foram os mesmos.

Após a determinação do valor da velocidade máxima específica de formação de células, realizou-se o cálculo da velocidade específica (μ) para cada tempo em que foram coletados os

dados e em seguida plotou-se o gráfico de μ em função da concentração de substrato, para determinação do parâmetro K_S , que é a concentração de substrato em que a velocidade específica de crescimento é igual a metade do valor máximo ($\mu_{m\acute{a}x}$). É possível observar no Gráfico (3) que o valor de K_S , para as condições do estudo usado como referência, é aproximadamente igual a 160 g.L⁻¹.

Gráfico 3 - Velocidade específica de crescimento celular em função da concentração de substrato.



Determinados os parâmetros da equação de Monod, foi possível calcular também os fatores de conversão, o rendimento em etanol, a conversão de substrato e a produtividade em etanol e em células, considerando o tempo de 192 h. Os resultados encontram-se disponíveis na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros cinéticos calculados a partir dos dados disponíveis em Brandão, Barroso e Lobato (2018)

Componente	Concentração Inicial (g.L ⁻¹)	Concentração Final (g.L ⁻¹)	$Y_{C/S}$ (g/g)	Produtividade em células (g.L ⁻¹ .h)	Conversão do substrato (%)
Substrato	270,31	110,85	0,002	0,0024	59,0
Células	2,39	2,78	$Y_{P/S}$ (g/g)	Produtividade em produto (g.L ⁻¹ .h)	Rendimento em produto (%)
Produto	0,00	69,8	0,438	0,36	48,0

Calculados os parâmetros, foi possível realizar o processo de simulação, ajustando os valores de forma que os resultados obtidos nesta etapa se ajustassem aos dados experimentais.

Ao término do processo de ajuste, as equações e parâmetros aplicados no Polymath® foram os seguintes:

Tabela 8 - Estimativas finais dos parâmetros e equações digitadas no Polymath

Parâmetros	Equações Diferenciais	Equações Explícitas
mimax= 0.0153	$d(CC) / d(dt) = rC - rd$	$mi = kobs * (CS / (KS + CS))$
KS=165	$CC(0) = 2.39$	$kobs = mimax * (1 - ((CP/Cp)^{0.52}))$
YPS=0.44	$d(CS) / d(dt) = rS$	$YPC = YPS / YCS$
YCS=0.0087	$CS(0) = 272$	$rC = mi * CC$
YSC=1/YCS	$d(CP) / d(dt) = rP$	$rS = -YSC * rC - m * CC$
m=0.03	$CP(0) = 0$	$rP = rC * YPC$
Cp=80	$dt(0) = 0$	$rd = kd * CC$
Kd=0,001	$dt(f) = 192$	

A partir dos dados obtidos foi possível comparar os resultados experimentais obtidos por Brandão, Barroso e Lobato (2018) com os obtidos após a simulação e verificar as condições experimentais se ajustavam bem ao modelo proposto. É possível observar nos Gráficos (4, 5 e 6) a comparação entre os valores teóricos (C_{C^*} , C_{S^*} e C_{P^*}) e os obtidos em laboratório (C_C , C_S e C_P).

Gráfico 4 - Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração celular.

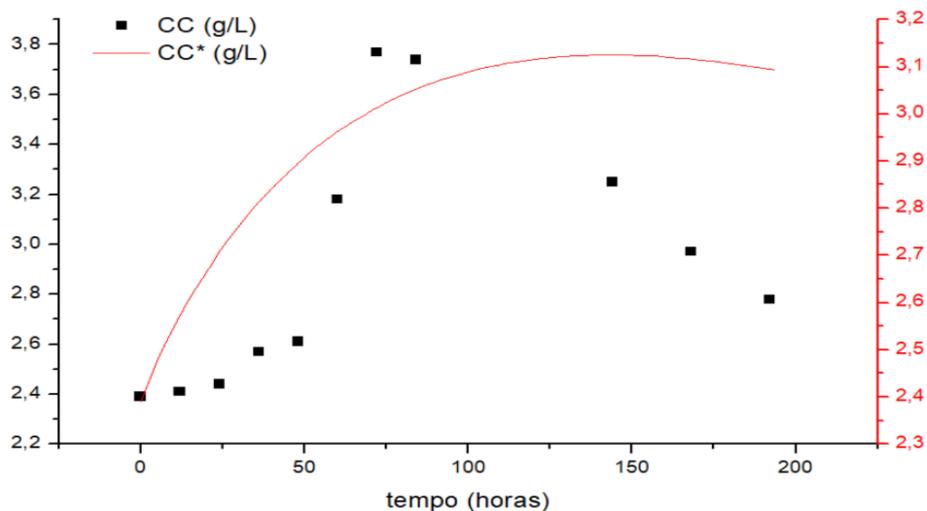


Gráfico 5 - Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração de substrato.

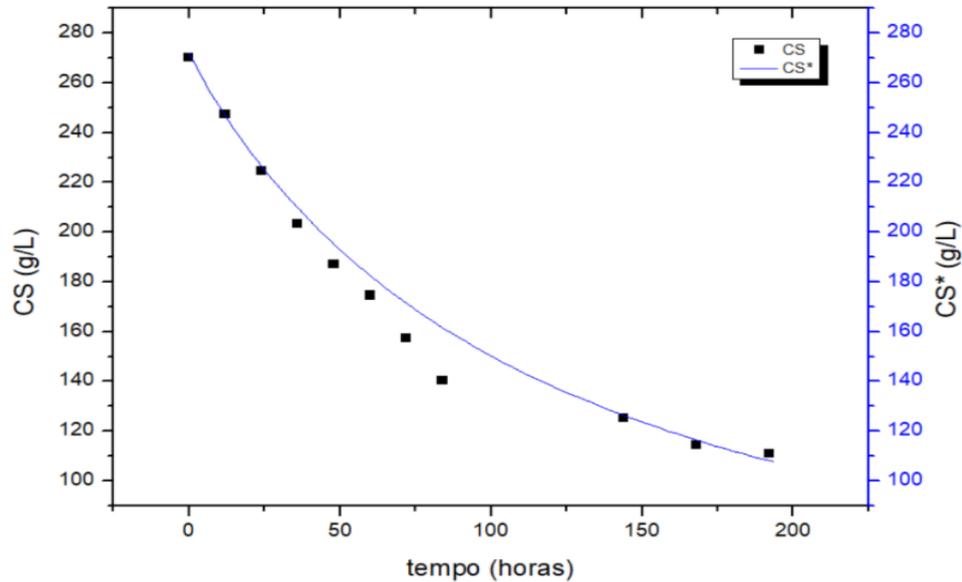
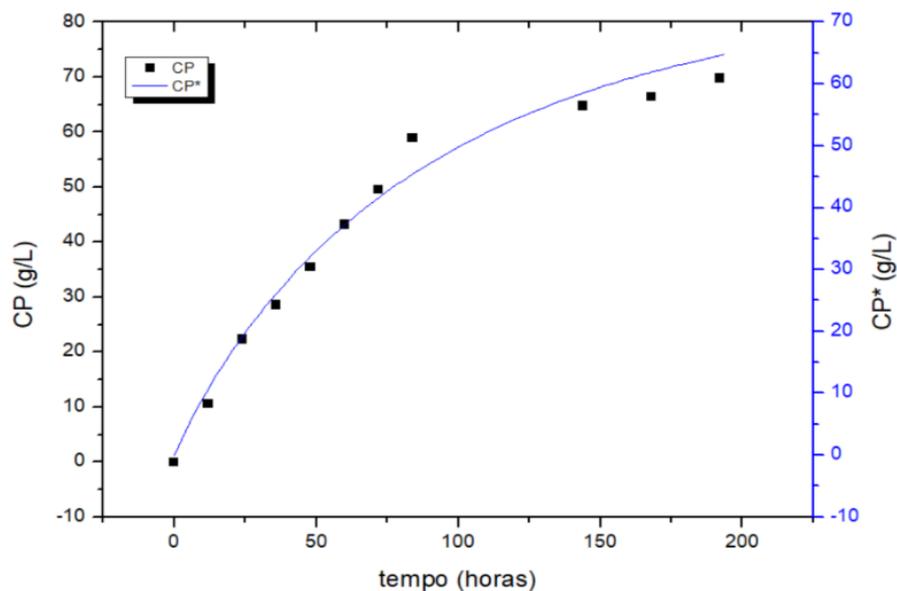


Gráfico 6 - Comparação dos valores simulados pelo modelo de Levenspiel e experimentais para a concentração de produto.



De todos os modelos avaliados para representar o comportamento de crescimento celular associado a formação de produto, o de Levenspiel, considerando a inibição pelo produto gerado, foi o que produziu melhores resultados, ao avaliar as três curvas de forma simultânea. Mesmo sendo observada a diferença entre o modelo e os dados para a concentração celular, levou-se em consideração que outros modelos não apresentaram ajuste para nenhuma das concentrações. Como a concentração de produto gerado e de substrato consumido permitem a definição da conversão e do rendimento em produto, e como não houve diferença significativa

entres os valores máximo e mínimo da concentração de células, este modelo foi escolhido para realizar a simulação dos experimentos, nas condições propostas a partir do planejamento composto central apresentado na Tabela 6, que tem por objetivo a otimização do processo fermentativo, indicando as concentrações iniciais que podem proporcionar maior geração de produto com menor consumo de substrato. Para cada simulação, variando-se as concentrações iniciais de substrato e de produto, foram gerados os gráficos das concentrações de células, glicose consumida e etanol produzido. O comportamento cinético esperado para cada componente, nos 9 ensaios propostos, pode ser observado nos Gráficos (7, 8 e 9):

Gráfico 7 - Comportamento cinético esperado para concentração celular.

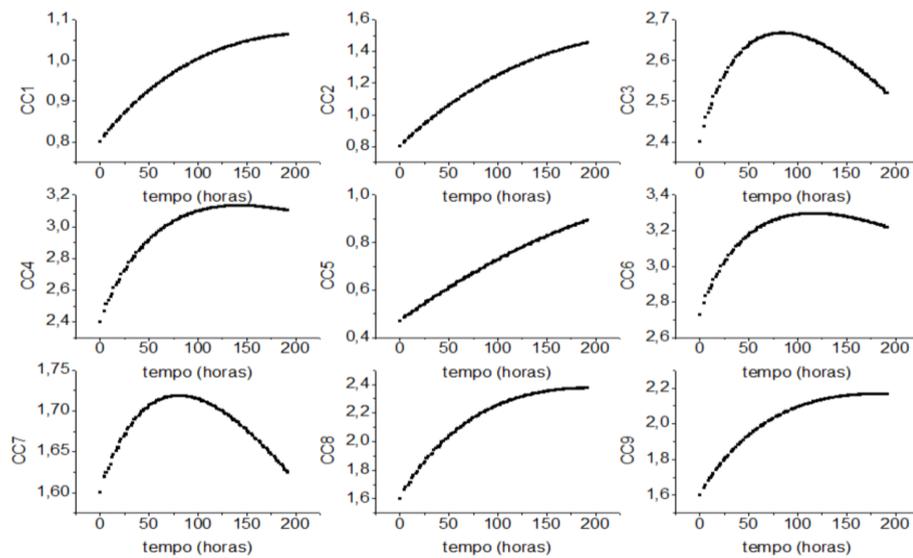


Gráfico 8 - Comportamento cinético esperado para concentração de substrato.

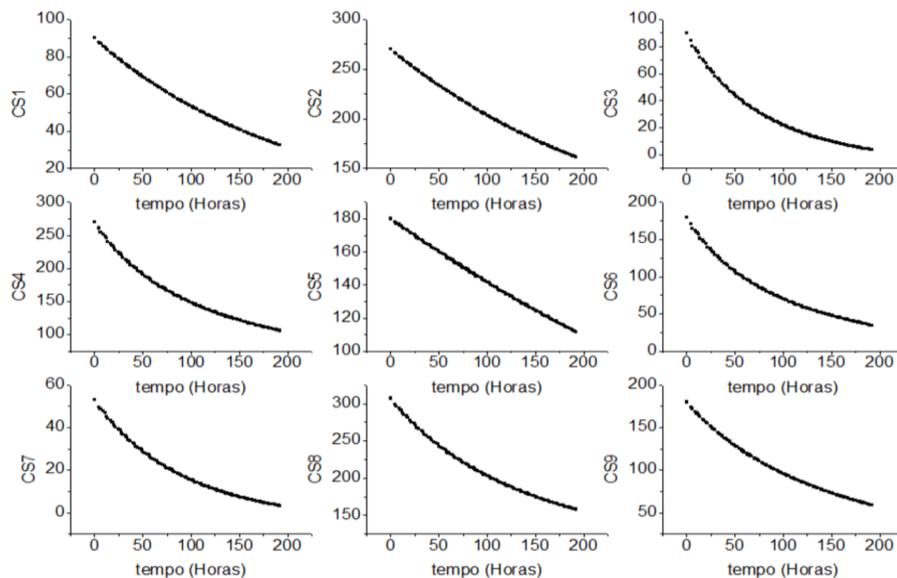
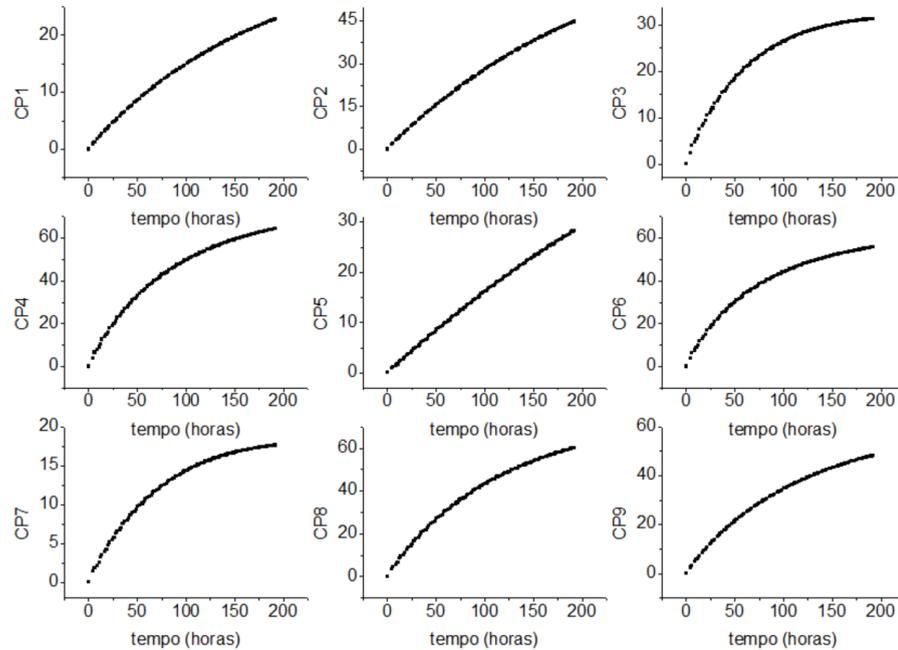


Gráfico 9 - Comportamento cinético esperado para concentração de produto

Conforme os resultados obtidos após a simulação, utilizando o modelo de Levenspiel, foi possível verificar um comportamento cinético de acordo com o observado em processos fermentativos aplicados para produção de hidromel, sendo verificadas a redução da concentração do substrato associada ao crescimento celular, até certo tempo, e aumento da quantidade de produto. Comportamento semelhante foi observado nos estudos realizados por Brito (2015), Pereira (2014) e Amorim (2018).

As diferenças observadas para cada ensaio, se devem as condições iniciais aplicadas de acordo com o planejamento composto central. Os resultados obtidos nos ensaios 3 e 7, podem ser explicados pela menor quantidade de substrato disponível para uma maior quantidade de células presentes no início do processo. Nesses casos, o rápido consumo da fonte de carbono, faz com que a fase de morte celular seja alcançada mais rapidamente e que o processo seja encerrado em tempos menores.

Após a simulação foi possível obter também os valores de concentrações na e em seguida realizar o cálculo da conversão de substrato X_s , da produtividade em células e etanol e do rendimento. Os resultados encontram-se na Tabela (9).

Tabela 9 - Parâmetros cinéticos.

Ensaio	C _{C0}	C _C	C _{S0}	C _S	C _{P0}	C _P	X _S	P _C	P _E	R
	(g.L ⁻¹)	(%)	(g.L ⁻¹ .h)	(g.L ⁻¹ .h)	(%)					
1	0,80	1,06	90,00	32,51	0,00	22,82	63,87	0,0014	0,128	50,63
2	0,80	1,45	270,00	161,40	0,00	44,74	40,22	0,0034	0,247	32,70
3	2,40	2,52	90,00	3,80	0,00	31,33	95,78	0,0006	0,188	74,46
4	2,40	3,11	270,00	106,18	0,00	64,50	60,67	0,0036	0,376	49,76
5	0,47	0,89	180,00	111,74	0,00	29,14	37,92	0,0022	0,152	30,09
6	2,73	3,22	180,00	34,88	0,00	55,75	80,62	0,0025	0,327	64,75
7	1,60	1,62	53,00	3,28	0,00	17,60	93,81	0,0001	0,105	70,75
8	1,60	2,37	307,00	157,92	0,00	60,12	48,56	0,0040	0,345	40,13
9	1,60	2,16	180,0	58,78	0,00	48,21	67,34	0,0029	0,277	54,82

É possível verificar que os melhores resultados foram obtidos nos ensaios 3 e 7, sendo alcançados, respectivamente, 95,78 e 93,81% de conversão e 74,46 e 70,75% de rendimento. Nesses dois experimentos a quantidade de substrato residual foi muito pequena e a quantidade de produto que poderia ser obtida foi superior, quando comparado aos outros ensaios. Entretanto, deve-se destacar que a quantidade de etanol gerada no ensaio 7 foi inferior ao exigido na legislação e para o ensaio 3, obteve-se um concentração percentual próximo a 4%, que é o menor valor permitido. Nesse sentido, quando se deseja obter uma bebida com maior teor alcóolico, as condições aplicadas no ensaio 6 podem ser mais interessantes. Observa-se também que para a obtenção desses resultados, foi testada uma maior quantidade de microrganismo em um meio reacional com a fonte de carbono em concentração mais baixa. Essa condição pode favorecer o consumo do substrato para formação de produto.

Com isso, realizou-se o desenvolvimento das superfícies de resposta, tendo como variáveis dependentes a conversão e o rendimento em produto. As curvas encontram-se nos Gráficos (10) e (11).

Gráfico 10 - Superfície de resposta e curva de nível para o Rendimento (%).

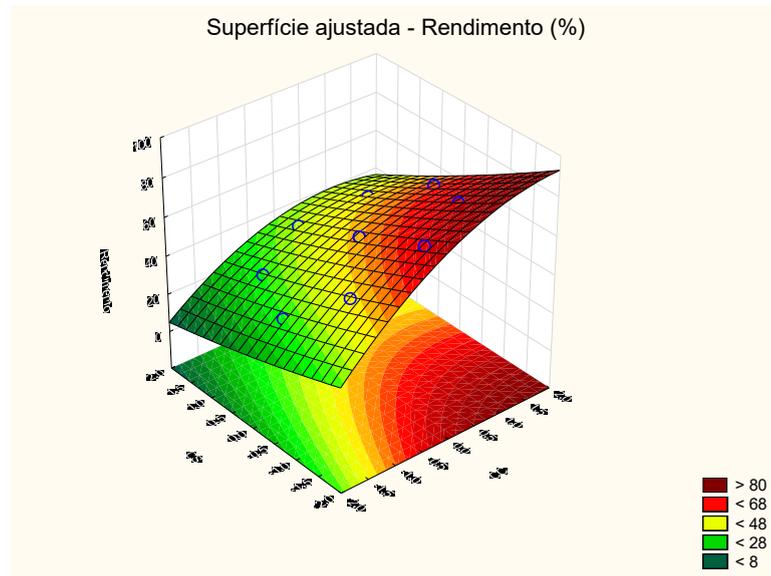
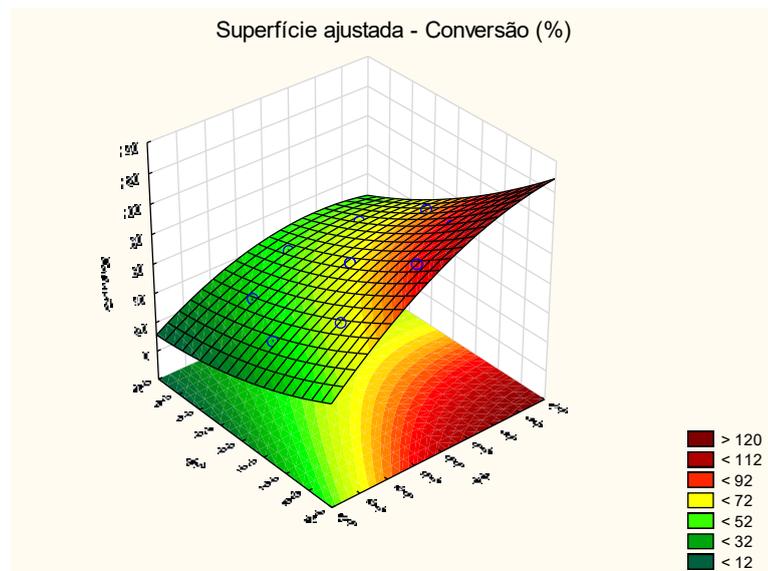


Gráfico 11 - Superfície de resposta e curva de nível para o Conversão (%).



Analisando as superfícies de resposta foi possível observar que os maiores valores de rendimento e conversão ocorrem nas regiões mais avermelhadas dos gráficos. Com isso, mais uma vez há a indicação de que as maiores concentrações de células testadas, quando submetidas a um meio reacional com as menores concentrações de substrato, podem produzir maiores quantidades de etanol, em relação a quantidade de açúcares disponível, sendo observado o maior consumo desse componente.

6 CONCLUSÃO

Partindo-se dos dados experimentais disponíveis na literatura foi possível estimar os parâmetros cinéticos e obter um modelo matemático capaz de representar o processo fermentativo para a obtenção de hidromel, usando um biorreator em batelada e a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. O modelo de Levenspiel para crescimento celular, considerando inibição pelo produto, foi o que gerou os melhores resultados.

Foi realizada a simulação do processo, variando as condições iniciais, sendo observado comportamento cinético de acordo com a literatura sobre o tema e que o hidromel produzido em todos os testes enquadraria-se na categoria suave. A maior conversão do substrato (95,78%), gerando menor quantidade residual de açúcar, e o maior rendimento em produto (74,46%), com a concentração de etanol dentro dos parâmetros legais, foram alcançados combinando o nível superior para concentração de células (2,39 g.L⁻¹) com o nível inferior para a concentração de substrato (90,0 g.L⁻¹).

REFERÊNCIAS

- AIBA, S.; SHODA, M.; NAGATANI, M. Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 10, n. 6, p. 845–864, nov. 1968.
- ALBUQUERQUE, Juliana Cosme Gomes.; SOBRINHO, Maria Elizangela.; LINS, Tulio Cesar de Lima. Análise da qualidade do mel de abelha comercializado com e sem inspeção na região de Brasília-DF, Brasil. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 42, n. 1, p. 71-80, 2021.
- ANDREWS, J. F. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 10, n. 6, p. 707–723, 1968.
- ASSOCIAÇÃO Brasileira de Estudo das Abelhas (A.B.E.L.H.A.). *In: Canal Tudo sobre Abelhas: Aplicações*. [S. l.], 20 ago. 2020. Disponível em: <https://abelha.org.br/aplicacoes/>. Acesso em: 4 jan. 2022.
- AZEVEDO, Danielly Carneiro de. **Avaliação das propriedades antimicrobianas do mel e da geoprópolis da abelha *Plebeia aff. Flavocincta* frente aos microorganismos *Staphylococcus aureus* e *Enterococcus faecalis***. 2019. 30 f. Artigo (Mestrado Profissional em Sistemas Agroindustriais) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agroindustriais, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2019.
- BARROS, Mariany Fernandes. **Estudo cinético da fermentação de bebida alcoólica de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)**. 2020. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.
- BATISTA, Ana Carolina. **Avaliação das características tecnológicas de hidromel tipo melomel produzido com diferentes cepas de *Saccharomyces cerevisiae***. 2017. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- BORGES, M. S.; PERES, F. I. G.; OLIVEIRA, D. M.; BERRETTA, A. A.; HORI, J. I. Utilização do mel como terapia complementar: uma revisão sobre as propriedades biológicas associadas ao mel. **Brazilian Applied Science Review**, v. 5, n. 2, p. 1027-1045, 2021.
- BRAGA, Daniel José Nascimento. **Implementação da modelagem matemática de biorreatores no simulador EMSO visando a simulação e a estimação de parâmetros cinéticos**. 2021, 61f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Ariquemes, 2021.
- BRANDÃO, L. G.; BARROSO, V. H.; LOBATO, A. K. C. L. Estudo Cinético da Produção de Hidromel pelas Cepas *Saccharomyces Cerevisiae* Lalvin 71b 1122 e *Saccharomyces Bayanus* Red Star Premier Blank. **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. São Paulo, 2018.

BRITO, Analu Freitas de Souza. **Análise cinética e estudos dos parâmetros fermentativos para a produção de hidromel**. 2015. 67f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia), Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé – Paraíba – Brasil, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/5534>.

BURLANDO, B.; CORNARA, L. (2013). **Honey in dermatology and skin care: a review**. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 12, 306–313.

CARNEIRO, Lucas Grober.; BOVOLINI, André Gandelman. **Modelagem matemática do processo de fermentação alcoólica em batelada com alta densidade celular: Efeito da concentração de substrato, células e temperatura nos parâmetros cinéticos. Orientador: Reinaldo Giudici e Keyv Pontes Eliodório**. 2020. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

CASTRO, Marília Galvão. **Pontos relevantes da produção de Hidromel**. 2021. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biotecnologia) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2021.

CASTRO, J. V. S.; BOSCH NETO, J. C. . Modelagem e simulação de biorreatores em série para a obtenção de etanol usando a equação de Tosetto. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa/MG, BR, v. 7, n. 2, p. 12228–01, 2021. DOI: 10.18540/jcecvl7iss2pp12228-01-08e. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/12228>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CONTOIS, D. E. Kinetics of bacterial growth: relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures. **Journal of General Microbiology**, v. 21, p. 40-50, 1959.

COSTA, A. M. G. *et al.* Caracterização e análise sensorial de hidromel: tipo seco tradicional e saborizado com morango. *In: XXV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Gramado-RS*. 2016.

COSTA, C. B. B.; BADINO, A. C. ANABIOPLUS: a new package for parameter estimation and simulation of bioprocesses. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 34, n. 4, p. 1065–1082, 2017.

COSTA, Emerson Rodrigues. **Modelagem e simulação do processo de fermentação alcoólica na indústria sucroalcooleira**. 2019. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2019.

Crane, E. (1992). **The world's beekeeping – past and present**. *In: J. M. Graham (Ed.), The hive and the honeybee* (pp. 1–22). Dadant & Sons.

SANTOS, Edilaine Alves da Silva. *et al.* Desenvolvimento e caracterização Físico-Química do Hidromel. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 57775-57787, 2021.

DA SILVA, Israel Walter Hilário da. *et al.* Perfil das propriedades e produtores de mel no município de Taperoá, Paraíba. **Caderno Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 2, 2017.

NOVAIS, J. S. de.; MARQUES, G. V.; OLIVEIRA, R. J. B. De.; BALIO, A. R da S. Perfil dos consumidores de mel em feiras livres de Porto Seguro, Bahia, Brasil. **International Journal of Business Marketing**, v. 6, n. 1, p. 45-57, 2021.

OLIVEIRA, Isabelle Valente de. *et al.* Produção e caracterização do hidromel tipo doce. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11176-11191, 2020.

ROLIM, Maria B. de Q. *et al.* Generalidades sobre o mel e parâmetros de qualidade no Brasil: revisão. **Medicina Veterinária (UFRPE)**, v. 12, n. 1, p. 73-81, 2018.

SOUSA, Milena Nunes Alves de. *et al.* Revista Brasileira de Gestão Ambiental. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental (Pombal-PB-Brasil)** v, v. 13, n. 1, p. 01-11, 2019.

DIREITO, William Vaz. *et al.* Produção de hidromel a partir de blends de méis de abelhas nativas da Amazônia Oriental. *In: Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, 22., 2018, Belém, PA. Anais... Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2018., 2018.*

FARIAS, Amanda Vasconcelos. *et al.* **Estudo cinético da fermentação alcoólica de *ingrediente* *edulis***. 2019.

FOGLER, H. S. **Cálculo de Reatores - O Essencial da Engenharia das Reações Químicas**. 1ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2016. ISBN: 9788521621621.

GOMES, R.; MIRANDA, M. E.; GOMES, E.; SOMBRA, D.; SILVA, J. Produção e qualidade de mel na zona da mata de Pernambuco. **Enciclopédia Biosfera**, v. 14, n. 26, 2017.

Gomes, Teresa Maria da Cruz. **Produção de Hidromel: efeito das condições de fermentação**. 2010. Bragança: ESA. Dissertação de Mestrado em Biotecnologia.

HOPPE, G. K.; HANSFORD, G. S. Ethanol inhibition of continuous anaerobic yeast growth, **Biotechnology Letters**, v. 4, no 1, 39-44, 1982.

JÚNIOR, Marcos Roberto Ribeiro.; CANAVER, Andressa Barranco.; BASSAN, Cassia Fernanda Domingues. Produção de hidromel: análise físico-química e sensorial. **Revista UNIMAR Ciências**, v. 24, n. 1-2, 2017.

JÚNIOR, Marcos Galletti. *et al.* **Características físico-químicas e sensoriais de hidroméis produzidos a partir de mel silvestre ou mel de aroeira, utilizando ou não pólen apícola na sua fabricação**. 2020.

LEE, J. M.; POLLARD, J. F.; COULMAN, G. A. - "Ethanol fermentation with cell recycling: computer simulation". **Biotechnology and Bioengineering**, v. 25, p. 497-511, 1983.

LEVENSPIEL, O. The monod equation: A revisit and a generalization to product inhibition situations. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, n. 8, p. 1671–1687, 1980.

LUDWIG, D.; WOLLMUTH, G. P.; FLORIANO, V. A.; ROCHA, D. F. de L. SANTOS OLIVEIRA, M.; MARQUES, M. Da S. Mel colonial: parâmetros de qualidade. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 92312-92323, 2020.

ALMEIDA, J. de M.; CRISTINA, F.; SILVA, R. . Acompanhamento da fermentação na produção de hidromel com utilização de *Saccharomyces cerevisiae* E *Saccharomyces boulardii*: fermentation monitoring in mead production with the use of *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces boulardii*. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/11476>. Acesso em: 31 jan. 2022

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 6.871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a Lei nº 8.918, de 14 julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Brasil. (2012).

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 34, de 29 de novembro de 2012. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade das bebidas fermentadas: fermentado de fruta; fermentado de fruta licoroso; fermentado de fruta composto; sidra; hidromel; fermentado de cana; saquê ou sake. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília-DF.

MONOD, J. **Recherches sur la Croissance des Cultures Bacteriennes**, Hermann & Cie., Paris, 1942.

MOSER, H. **The dynamics of bacterial population maintained in the chemostat**, Carnegie Institute of Washington. Washington, 1958.

MUNIEWEG, F. R. *et al.* Produção artesanal de hidromel como diversificação da produção apícola na fronteira - oeste, RS. *In: Anais do XXV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos- Alimentação: arvore que sustenta a vida*, Gramado, Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/sbctars-eventos/xxvcbcta/anais/files/283.pdf>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2022.

NAKADA, J. P.; CACIATORI, L. U.; PANDOLFI, M. A. C. VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UMA INDÚSTRIA PRODUTORA DE HIDROMEL. **Revista Interface Tecnológica**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 431-443, 2020. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/789>. Acesso em: 28 dez. 2021.

OLIVEIRA, C. M. *et al.* AnaBioPlus: um novo pacote para estimativa de parâmetros e simulação de bioprocessos. **Revista Brasileira de Engenharia Química** , v. 34, p. 1065-1082, 2017.

PEREIRA, Rauber Daniel. **Fermentação alcoólica: desenvolvimento de metodologia para o cálculo de eficiência e modelagem por redes neurais de unidade de fermentação industrial**. 2019.

PIOVESAN, Natiéli. *et al.* Anais do 3º seminário de Ciência e Tecnologia de Alimentos-SECTA. **Seminário de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2021.

RAMOS, Bernadete de Farias. **Avaliação do processo fermentativo na produção de aguardente de seriguela (*Spodias purpurea* L.)**. 2018. 60f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia), Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé – Paraíba – Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4644>.

RAMOS, Thalita Ranielly Moraes. **Possíveis contribuições da Associação de Apicultores e Melipolicultores na Socioeconomia no Município de São José dos Cordeiros - PB**. 2018. 34f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Artigo), Curso Superior de Tecnologia em Gestão Pública, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé – Paraíba – Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4322>.

RIBEIRO, Larissa Helen de Lima. **Produção e caracterização de hidromel de frutas vermelhas**. 2017.

ROSA, Regiani Zanon. **Elaboração de vinho rosê a partir da uva Niágara rosada (*Vitislabrusca*) produzidas no estado de Rondônia: parâmetros físico-químicos, microbiológicos e sensoriais**. 2017, 68 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Fundação Universidade Federal de Rondônia, Ariquemes, 2017.

SANTOS, Sebastião Pereira. *et al.* Perfil da produção apícola e qualidade físico-química de méis produzidos no agreste Paraibano. **Archives of Veterinary Science**, v. 24, n. 4, 2019.

SANTOS, Sebastião Pereira. *et al.* **Perfil da produção apícola em unidades familiares no agreste paraibano**. 2017.

SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotecnologia Industrial**. Blucher, São Paulo, 2001.

SCHWARZ, Luisa Vivian. **Hidromel: suplementação nutricional, efeito de leveduras e caracterização de "Moscatto-Pyment"**. 2019.

SILVA, R. A. da. *et al.* Composição e propriedades terapêuticas do mel de abelha. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 17, n. 1, p. 113-120, 2008.

SILVA, M. G.; SANTANA, A. G.; SILVA, P. R. M.; SILVA, R. A.; MEDEIROS, A. C.; MARACAJÁ, P. B. (2020). **Rotulagem dos méis de *Apis mellifera* comercializados no Alto Sertão da Paraíba**. ACTA Apícola Brasilica.

VELOSO, I. I. K. **Modelagem e otimização da fermentação alcoólica em batelada alimentada a baixa temperatura**. 2019. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

VIDAL, M. F. Desempenho da apicultura nordestina em anos de estiagem. **Caderno Setorial Etene**. ano II, n. 11, p. 1-10, 2017.

DANTAS, Tammyrys Maria de Oliveira. **Avaliação cinética da fermentação alcoólica de mel industrial como substrato para produção de hidromel**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia de Alimentos. Centro de Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba,

2016.

VIDAL, Maria de Fátima. Evolução da produção de mel na área de atuação do BNB. Caderno Setorial ETENE. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, ano 5, n.112, abr. 2020.

VIDAL, Maria de Fátima. Mel natural: cenário mundial e situação da produção na área de atuação do BNB. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, ano 6, n.157, mar. 2021. (Caderno Setorial ETENE).

Wanderley, B. R. S. M.; Haas, I. C. S.; Vieira, M. P. T.; AQUINO, A. C. M. S.; AMBONI, R. D. M. C.; FRITZEN-FREIRE, C. B. F. Influência da adição de polpa de uvaia (*Eugenia pyriformis* Cambess) no processo fermentativo de hidromel. **7º Simposio de Segurança Alimentar**. 2020.

WU, Y. C.; HAO, O. J.; OU, K. C.; SCHOELZE, R. J. Treatment of leachate from solid waste landfill site using a two-stage anaerobic filter, **Biotechnology and Bioengineering**, v. 31, p. 257-266, 1988.

ZANARDI, M. S.; COSTA JR, E. F. Influência da réplica experimental nos parâmetros estimados para os modelos cinéticos da produção de etanol em batelada. **Blucher Physics Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 86-90, 2015.

ZANIN, G., MARONESI, S. B., BORGONOV, T. F., PENNA, A. L. B., DATO, M. C. F., & DIAMANTINO, M. T. R. S. Atividade Antimicrobiana e potencial antioxidante de mel de diferentes marcas. **Ciência e Tecnologiados Alimentos**. Volume6, p. 50. 20.