

# PROCESSO CINÉTICO FERMENTATIVO DE MEL DE ABELHA PARA PRODUÇÃO DE BEBIDA MISTA

## KINETIC FERMENTATION PROCESS OF BEE HONEY FOR PRODUCTION OF MIXED BEVERAGES

DOI: 10.65747/conali2025v1c15

Arthur Fernandes Araújo<sup>1</sup>, Natália Ferreira Negreiros<sup>2</sup>, Jordan Dias de Souza Silva<sup>3</sup>, Vitória Larissa Melquíades da Silva<sup>4</sup>, Deyzi Santos Gouveia<sup>5</sup>, Adriano Sant'ana Silva<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro de Alimentos - CCTA - UFCG; <sup>2</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - CCT – UFPB; <sup>3</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos - CTRN – UFCG; <sup>4</sup>Estudante do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola - CTRN – UFCG; <sup>5</sup>Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – CTRN – UFCG <sup>6</sup>Docente do Depto de Engenharia de Alimentos – CTRN – UFCG

Contato: engaliarthur.fernandes@gmail.com

**Resumo:** O uso de mel de abelha na elaboração de bebidas alcoólicas mistas acompanhando processo fermentativo para melhorias de otimização e valorização dessa classe de produtos se demonstra uma alternativa promissora, especialmente para as regiões do Nordeste do Brasil, visto que se trata de um produto regional muito consumido, agregando valor à produção apícola. No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliam as variáveis que influenciam no processo de fermentação. Dentro dessa perspectiva o presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento cinético da fermentação alcoólica do mel de abelha com adição de lúpulo, visando a produção de uma bebida alcoólica mista. Foram conduzidos quatro experimentos variando as concentrações de sólidos solúveis totais (10 e 18 °Brix) e de levedura *Saccharomyces cerevisiae*, além de um ponto central com quatro repetições, verificando quais variáveis têm interferência no processo. O processo fermentativo foi monitorado quanto ao consumo de açúcares redutores, produção de etanol e concentração celular. Os resultados demonstraram que a produção de etanol foi influenciada significativamente apenas pela concentração de substrato, enquanto a concentração de leveduras não exerceu efeito relevante, o que é um ponto positivo da perspectiva econômica para a indústria. Observou-se consumo de aproximadamente 80% dos açúcares redutores nos experimentos com maior carga de levedura, atingindo teores de 11,7 g/L e 38,3 g/L em 48 horas. A maior produção de etanol foi registrada nos experimentos 3 e 4, com 69,52 g/L. A caracterização físico-química do mel confirmou a adequação aos padrões legais exigidos pela legislação vigente. Ainda verificou-se uma discreta redução nos açúcares redutores nos mostos com maior concentração de leveduras, o que pode impactar no perfil sensorial da bebida. Conclui-se, portanto, que a produção de bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo é tecnicamente viável, representando uma alternativa de diversificação produtiva para o setor agroindustrial do Alto Sertão Paraibano e do Nordeste.

**Palavras-chave:** bebida alcoólica; leveduras, fermentação

**Abstract:** The use of honey in the preparation of mixed alcoholic beverages, accompanied by the fermentation process, to improve the optimization and value of this

class of products, has proven to be a promising alternative, especially for the Northeast regions of Brazil, as it is a widely consumed regional product, adding value to beekeeping production. However, studies evaluating the variables that influence the fermentation process are still scarce. From this perspective, the present study aimed to analyze the kinetic behavior of the alcoholic fermentation of honey with the addition of hops, aiming at the production of a mixed alcoholic beverage. Four experiments were conducted, varying the concentrations of total soluble solids (10 and 18°Brix) and *Saccharomyces cerevisiae* yeast, in addition to a central point with four replicates, verifying which variables influence the process. The fermentation process was monitored for reducing sugar consumption, ethanol production, and cell concentration. The results demonstrated that ethanol production was significantly influenced only by substrate concentration, while yeast concentration had no significant effect, which is a positive economic outlook for the industry. Approximately 80% of the reducing sugars were consumed in the experiments with the highest yeast load, reaching levels of 11.7 g/L and 38.3 g/L within 48 hours. The highest ethanol production was recorded in experiments 3 and 4, with 69.52 g/L. The physicochemical characterization of the honey confirmed compliance with the legal standards required by current legislation. A slight reduction in reducing sugars was also observed in the musts with the highest yeast concentration, which may impact the beverage's sensory profile. Therefore, it is concluded that the production of a mixed alcoholic beverage from honey and hops is technically feasible, representing an alternative for productive diversification for the agroindustrial sector of the Alto Sertão region of Paraíba and the Northeast.

**Keywords:** alcoholic beverage; yeast, fermentation

## INTRODUÇÃO

O mel de abelha é um dos alimentos mais antigos consumidos pelo ser humano, sendo amplamente valorizado não apenas por seu sabor, mas também por suas propriedades funcionais, como ação antimicrobiana, antioxidante e nutricional (1). No cenário apícola brasileiro, o mel é tradicionalmente produzido para comercialização como alimento in natura, porém a necessidade de diversificação de produtos e o aproveitamento de méis fora do padrão de comercialização estimulam a busca por alternativas industriais, como a elaboração de bebidas fermentadas.

As bebidas alcoólicas obtidas a partir do mel, como o hidromel, apresentam um mercado em expansão devido ao interesse dos consumidores por produtos artesanais e diferenciados (2). No entanto, a produção de bebidas alcoólicas mistas a partir do mel, que combinam ingredientes como frutas, especiarias ou lúpulo, surge como uma alternativa promissora para agregar valor, criar novas experiências sensoriais e ampliar o mercado de produtos fermentados (3, 4).

A fermentação do mel ocorre por meio da ação de leveduras, principalmente do gênero *Saccharomyces*, que convertem os açúcares em etanol e outros metabólitos (5). Entretanto, o processo cinético fermentativo do mel apresenta particularidades relacionadas à composição do substrato, como a elevada concentração de açúcares

simples, o baixo pH e a carência de nutrientes essenciais para o metabolismo microbiano, exigindo ajustes nos parâmetros fermentativos para garantir eficiência e qualidade do produto final (6, 7).

Além disso, a literatura ainda carece de estudos detalhados sobre as variáveis que influenciam a cinética da fermentação do mosto de mel para bebidas mistas, como a influência do °Brix, da concentração de leveduras e do tempo de fermentação. A compreensão desses fatores é fundamental para otimizar o processo e garantir a padronização da bebida (3).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o processo cinético fermentativo do mel de abelha para a produção de uma bebida alcoólica mista, visando contribuir com o desenvolvimento tecnológico e com a diversificação da cadeia produtiva do mel no Brasil.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Transporte, Operações Unitárias e Controle de Processos Químicos, da Unidade Acadêmica de Tecnologia de Alimentos, do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campus Pombal, Paraíba.

O mel de abelha (*Apis mellifera*) decantado foi adquirido na Cooperativa dos Apicultores de Catolé do Rocha (COAPIL), em baldes de 25 quilogramas. Ao ser recepcionado no laboratório o mel foi caracterizado quanto à acidez total titulável, pH, açúcares redutores e redutores totais, sólidos solúveis totais, teor de cinzas, teor de umidade e hidroximetilfurfural.

### **Planejamento experimental**

O processo de fermentação do mosto de mel de abelha adicionado de lúpulo foi avaliado mediante a aplicação de um planejamento experimental 2<sup>2</sup> composto por 4 pontos centrais. As variáveis de entrada concentração de levedura e sólidos solúveis totais, foram utilizadas para se avaliar as respostas conversão (C) e fator de conversão em células ( $Y_x/s$ )

Na Tabela 1 encontram-se, respectivamente, os níveis reais e codificados das variáveis de entrada estudados na fermentação alcoólica do mel de abelha. Os níveis reais foram estabelecidos mediante pesquisa na literatura especializada.

Tabela 1 – Níveis reais e codificados das variáveis de entrada empregados na fermentação alcoólica do mel de abelha

Variáveis de entrada	Níveis		
	-1	0	+1
Sólidos solúveis totais (°Brix)	10	14	18
Concentração de levedura (g/L)	1	2,5	4

Fonte: dos autores (2025).

Para a análise dos resultados obtidos utilizou-se o programa computacional Statistica v.5.0. A partir da análise no programa computacional, foi possível obter o gráfico de Pareto, o modelo matemático para a representação dos dados experimentais, validar o modelo matemático por meio da análise de variância (ANOVA) e pelo gráfico de valores previstos versus valores observados, e gerar os gráficos de superfície de resposta e curvas de nível.

O gráfico de Pareto foi utilizado para avaliar os efeitos das variáveis sobre as respostas em estudo. A ANOVA dos modelos gerados válida se o mesmo representa e prediz com precisão o processo.

Os gráficos de superfície de resposta e curvas de nível representam graficamente o modelo matemático obtido e indicam o perfil das variáveis independentes sobre as respostas em estudo. O modelo matemático ainda foi avaliado quanto à significância de sua regressão ao nível de 95% de confiança, ao coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e falta de ajuste (8).

### Processo fermentativo

O modo de operação do processo fermentativo foi em batelada, sendo utilizados biorreatores em polipropileno de grau alimentício, com capacidade de 5 litros.

O mosto foi preparado mediante diluição do mel de abelha com água potável da rede pública, duplamente filtrada em filtro de carvão ativado, retenção de cloro C-III e retenção de partículas P-III ( $\geq 5$  a  $< 15$   $\mu\text{m}$ ) e filtro de polipropileno atóxico, retenção de

partículas P-II (>1 a <5 µm). Diferentes mostos foram preparados mediante a diluição do mel de abelha e água, sendo os sólidos solúveis ajustados conforme planejamento experimental.

Para cada experimento, contendo 4 litros de mosto final foram adicionados 100 ppm de SO<sub>2</sub>, tendo o metabisulfito de potássio enológico (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (Indupropil) como fonte e 1 g de nutriente enológico da Perdomini-IOC® (fosfato de amônia dibásico - 23%; sulfato de amônio E517 - 63%; cloridrato de tiamina - 0,2% e excipiente perlita).

O lúpulo utilizado nos experimentos, foi o lúpulo Nugget, da LNF, com 13,3% de ácido alfa. A adição do lúpulo ocorreu no início da fermentação por maceração (“dry hop”), na concentração de 10 g/L.

Para a fermentação utilizou-se a levedura comercial da Perdomini-IOC®, Blastosel-Gama® (*Saccharomyces bayanus*). O preparo do inóculo consistiu na pesagem da levedura, conforme estabelecido no planejamento experimental, e posterior reidratação em 200 mL de mosto diluído a 8°Brix por 10 minutos.

Após este tempo, o frasco erlenmeyer de 500 mL contendo 200mL de mosto de mel de abelha e levedura foi levado para um agitador magnético para a propagação por 12 horas a 30 °C. As leveduras propagadas foram transferidas para os fermentadores para dar início a inoculação do mosto cervejeiro.

O acompanhamento do processo fermentativo, ocorreu mediante a coleta de alíquotas de 100 mL foram coletadas dos fermentadores em recipientes tipo PET nos tempos 0, 12, 24, 48, 72, 96, 120 e 144 horas, para as análises físico-químicas.

### **Análises físico-químicas**

Ao longo do processo fermentativo, as alíquotas coletadas em tempos pré-estabelecidos, foram caracterizadas quanto acidez total titulável, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos solúveis totais (SST) com refratômetro de bancada tipo Abbe Bel RMT, açúcares redutores totais (ART), pelo método descrito por (9), a concentração celular (biomassa) do fermentado foi determinado conforme metodologia descrita por (10), a qual utiliza câmara de Neubauer para contagem de célula (cel/L) e o teor alcoólico foi determinado por ebulliometria.

### **Parâmetros cinéticos fermentativos**

Ao término do processo fermentativo foram determinados os parâmetros de conversão (C), fator de conversão substrato produto ( $Y_{p/s}$ ), fator de conversão substrato célula ( $Y_{x/s}$ ) e tempo de geração ( $t_g$ ).

$$Y_{\frac{X}{S}} = \frac{X - X_0}{S_0 - S}$$

$$Y_{\frac{P}{S}} = \frac{P - P_0}{S_0 - S}$$

$$\text{Conversão}(\%) = \frac{P}{(S_0 \times 0,511)} \times 100$$

$$t_g (h) = \frac{0,693}{\mu_{\text{máx}}}$$

Em que “X0” representa a concentração inicial de células (cel/mL); “X” é a concentração de células final (cel/mL); “P0” é a concentração inicial de produto (g/L); “P” é a concentração final de produto (g/L); “S0” é a concentração inicial de substrato (g/L); “S” é a concentração final de substrato (g/L); “tg” é o tempo de fermentação (h).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização físico-química do mel

O mel de abelha é um produto amplamente consumido no Brasil e no mundo, sendo constituído principalmente por glicose e fruto.

Na Tabela 2 encontram-se os valores médios referentes à caracterização do mel de abelha quanto à acidez total titulável, pH, açúcares redutores, sólidos solúveis, teor de água e cinzas.

Tabela 2 – Caracterização físico-química do mel para a bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.

Parâmetros	Resultados	MAPA
Acidez Total (meq/kg)	33,1 ± 0,55	Máx. 50 meq/kg
pH	4,5 ± 0,1	NR
Açúcares redutores (%)	79 ± 0,2	Mín. 65
Sólidos solúveis	83 ± 0,0	NR
Teor de água (%)	17 ± 0,0	Máx. 20
Cinzas (%)	0,11 ± 0,01	Máx. 0,6

5-Hidroximetilfurfural (mg/kg)

43,2 ± 1,03

Máx. 60 mg/kg

---

Fonte: dos autores (2025).

Para acidez total, foi determinado valor médio de 70,5 meq/kg, no qual podemos observar que o mesmo se encontra fora das recomendações propostas pelo padrão de identidade e qualidade de méis brasileiro. Na legislação brasileira para este parâmetro é determinado que o seu valor máximo seja de 50 meq/kg (11).

Este comportamento é ocasionado devido a uma série de mudanças no mel, que se relaciona com o grau de deterioração do produto frente a variação nos fatores extrínsecos, que vai desde a coleta do produto até sua comercialização e armazenamento. De acordo com (12), a acidez é tida como um dos parâmetros de avaliação do estado de maturação e deterioração do mel, sabendo-se que quando o mel apresenta certas mudanças em sua composição desencadeará uma série de reações e alterações, entre elas a fermentação. Como consequência desta ação a acidez tende a aumentar. Segundo (13), os maiores valores de acidez podem ser devidos à fermentação por microrganismos que convertem os açúcares da oxidação de ácidos carboxílicos em álcoois, enquanto a alta umidade e altas temperaturas favorecem esses tipos de reações químicas.

Desse modo, é possível determinar que o mel, em sua etapa de armazenamento para comércio, não apresentou condições ambientais ideais para manter sua preservação e qualidade durante a estocagem.

Para o pH, foi encontrado valor médio de 3,25. Na legislação vigente não há indicativo de faixas de valores para este parâmetro, embora seja considerado como importante na determinação da qualidade do produto. O pH é tido como sendo uma variável auxiliar na determinação da qualidade do mel, visto que sua análise permite indicar o grau de deterioração e adulteração caso o produto tenha sido submetido. Valores próximos foram observados por (14) onde verificaram valores para pH entre 3,05 a 3,91, (15) relatou variação de 3,15 a 3,83 para o respectivo parâmetro.

Em determinação aos açúcares redutores, foi verificado valor médio de 83,2%. Estando dentro dos padrões estabelecidos pela legislação brasileira (11), onde determina que o valor mínimo seja de 65%. (13) expressa que os açúcares redutores presentes no mel são compostos por frutose e glicose, apresentando capacidade de reduzir íons de cobre em solução alcalina. Um outro destaque para os méis nativos é por mostrarem menor teor de açúcar e o sabor doce de forma marcante. A frutose irá atuar no mel como componente a favorecer a doçura, já a glicose como agente de cristalização.

Valores aproximados aos do presente estudo foram encontrados por (16) ao analisarem méis nativos, apresentando resultados em torno 59,9 a 70,9 %. De modo semelhante foi observado por (17) obtendo valores na faixa de 51,8 a 62,1% para o respectivo parâmetro.

Para teor de água, o valor médio determinado foi de 19,4%, apresentando conformidade com os padrões determinados pela legislação brasileira (11) no qual estabelece valor máximo de 20% para o respectivo parâmetro. Valores próximos foram encontrados por (18) em estudos de méis do curimataú paraibano variando entre 19,4 a 19,8%. Um aspecto preocupante nos resultados determinados trata-se do valor que se apresentou próximo ao limite permitido, pois a umidade é o fator de qualidade que determina a capacidade atual do mel de abelha permanecer estável e livre de fermentação. Quanto menor a umidade, menor a probabilidade de o mel fermentar ao longo de seu período de armazenamento (19) (20).

Igualmente ao pH, os sólidos solúveis totais (°Brix) também não são indicados pela legislação brasileira. O valor médio observado foi de 80,6 °Brix, valor este próximo ao encontrado por (21) que verificaram uma faixa de variação de 67,50 a 77,50 °Brix para méis produzidas no Pará. No entanto, tal estudo foi necessário para obter o valor inicial em °Brix e realizar os procedimentos de diluições de acordo com os experimentos deste trabalho dispostos na Tabela 2.

O percentual do teor de cinzas foi observado e obteve valor médio de 0,05%. Segundo a legislação vigente (11) este valor se encontra dentro dos padrões estabelecidos, no qual determina que o conteúdo de cinzas para mel floral seja no máximo até 0,6%. A análise de cinzas permite detectar algumas irregularidades do mel, como falta de higiene, falha na decantação, falha na filtração ou aquisição do mel através da prensagem dos favos (22). De acordo com (23) foi encontrado valores próximos ao do presente estudo, variando de 0,04 a 0,78%, (16) obtiveram valores que variaram de 0,09% a 1,41% para méis de abelhas nativas do Acre.

Para hidroximetilfurfural (HMF) o valor observado foi de 92,7 mg/kg, este resultado indica não conformidade com os padrões preconizados pela legislação brasileira (11), onde estabelece valor máximo de 60 mg/kg para o parâmetro em estudo. HMF é considerado um indicador de deterioração da qualidade, indicando que o produto pode ser antigo ou que tenha sido submetido à adulteração. No mel recém-colhido, sua concentração às vezes é tida como ausente, a depender das condições a qual o produto foi armazenado, ou seja, não se apresenta no mel. Entretanto, sua concentração tende

a aumentar com o tempo de armazenamento uma vez quando exposto a fatores extrínsecos (luminosidade, umidade, oxigênio e calor) (19).

Conforme abordado anteriormente, a presença deste componente não se relaciona exclusivamente à adulteração do produto. Quando analisada a presença deste componente nos alimentos, em especial aquele cujo apresenta em sua composição valores considerados de carboidratos (glicose e frutose), uma vez que é submetido a processamento térmico ocasionará na formação do furfural e hidroximetilfurfural.

(24) e (18) encontraram valores próximos aos do presente estudo, variando de 23,18 a 82,90 mg/kg, 29,74 a 169,30 mg/kg, respectivamente, em pesquisas de méis.

### **Planejamento experimental**

Na Tabela 3 encontram-se apresentados a matriz do planejamento experimental 22 com 4 pontos centrais, tendo como variáveis independentes o °Brix e a concentração de levedura e como resposta teor alcoólico do fermentado.

Tabela 3 – Matriz do planejamento com os valores reais das variáveis e resultados.

<b>Experimentos</b>	<b>°Brix</b>	<b>Conc. Levedura (g/L)</b>	<b>Teor alcoólico (g/L)</b>	<b>Teor alcoólico (%)</b>
1	10,0	1,0	36,34	4,6
2	10,0	4,0	36,34	4,6
3	18,0	1,0	69,52	8,8
4	18,0	4,0	69,52	8,8
5	14,0	2,5	51,00	6,4
6	14,0	2,5	50,56	6,4
7	14,0	2,5	50,56	6,4
8	14,0	2,5	50,00	6,3

Fonte: dos autores, 2025

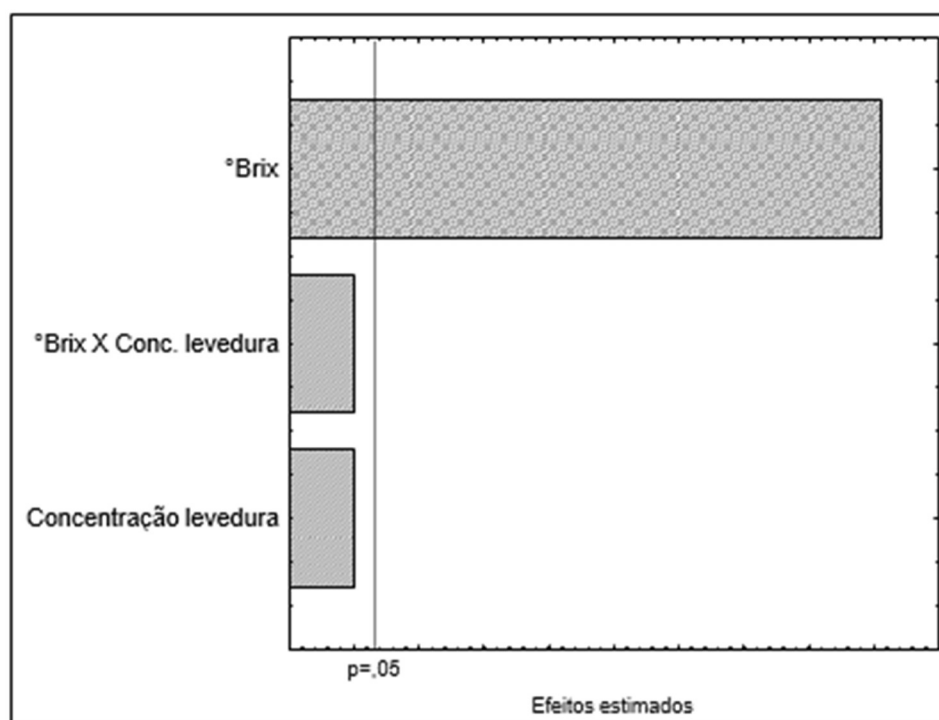
A análise dos resultados obtidos permitiu avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre a variável dependente, por meio de análise estatística, com intervalo de confiança de 95%. Além disso, verificou-se que se o fermentado alcoólico de mel de abelha e lúpulo for direcionado para a formulação de bebida alcoólica mista, o teor alcoólico obtido para todos os experimentos encontram-se na faixa de valores exigida pela Instrução Normativa (IN) N° 55 de 31 de outubro de 2008 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (25) a qual determina que a bebida alcoólica mista deve conter teor alcoólico entre 0,5 e 54%. (26) ao estudar a dinâmica de fermentação do vinho de mel etíope fermentado espontaneamente, encontrou teores alcoólicos máximos de álcool  $12,02 \pm 0,02$  g/100 mL foi registrado após 24 dias de fermentação em amostras. O teor alcoólico obtido neste estudo foi de 69,52 g/L, valor inferior ao reportado por (26).

No estudo de (14) que trabalhou no desenvolvimento de bebida de mel fermentada e Kombucha com infusão de erva-mate, no preparo do experimento relata ter adicionados sacarose (Controle), mel de abelha Apis, mel de abelha Borá e mel de

abelha Mandaguari, até atingir 10° Brix, valor esse contido na matriz de planejamento do presente estudo.

Na Figura 1 encontra-se apresentado o gráfico de Pareto, utilizado para a avaliação dos efeitos significativos das variáveis independentes na produção de álcool em um nível de 95% de confiança.

Figura 1 – Diagrama de Pareto para os efeitos das variáveis independentes sobre o teor alcoólico.



Fonte: dos autores, 2025

A partir da análise do diagrama de Pareto, constatou-se que a produção de etanol foi significativamente influenciada apenas pela concentração de substrato, não sendo observados efeitos relevantes da concentração de leveduras, tampouco da interação entre concentração de substrato e concentração celular. Verificou-se que o aumento da concentração de sólidos solúveis totais na fermentação alcoólica resultou em incremento no teor alcoólico do produto final, evidenciando um efeito positivo sobre a resposta.

Com base nos resultados obtidos na análise dos efeitos da concentração de leveduras e do °Brix sobre o teor alcoólico, procedeu-se à análise de regressão para o ajuste de um modelo matemático representativo do comportamento dos dados experimentais. No modelo gerado, foram incluídas apenas as variáveis que

apresentaram efeito estatisticamente significativo, considerando um nível mínimo de confiança de 95%.

Dessa forma, o modelo de regressão que relaciona o teor alcoólico às variáveis independentes está representado na equação:

$$\text{Teor Alcoólico (g L}^{-1}\text{)} = -6,335 + 4,147 \times \text{Brix}$$

Na Tabela 4 encontra-se o quadro da análise de variância para o planejamento experimental utilizado neste estudo, bem como o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e o erro relativo médio (ERM).

Tabela 4 – Análise de variância simplificada para o processo fermentativo.

	<b>SQ</b>	<b>G L</b>	<b>Fcal</b>	<b>Fta b</b>	<b>Fcal/Ftab</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>ERM</b>
<b>Regressão</b>	1100,91 2	3	122,0 84	6,5 9	18,5	98,9	2,44%
<b>Resíduo</b>	12,024	4					
<b>Falta de ajuste</b>	11,520	1					
<b>Erro puro</b>	0,504	3					
<b>Total</b>	1112,93 6	7					

Fonte: dos autores, 2025

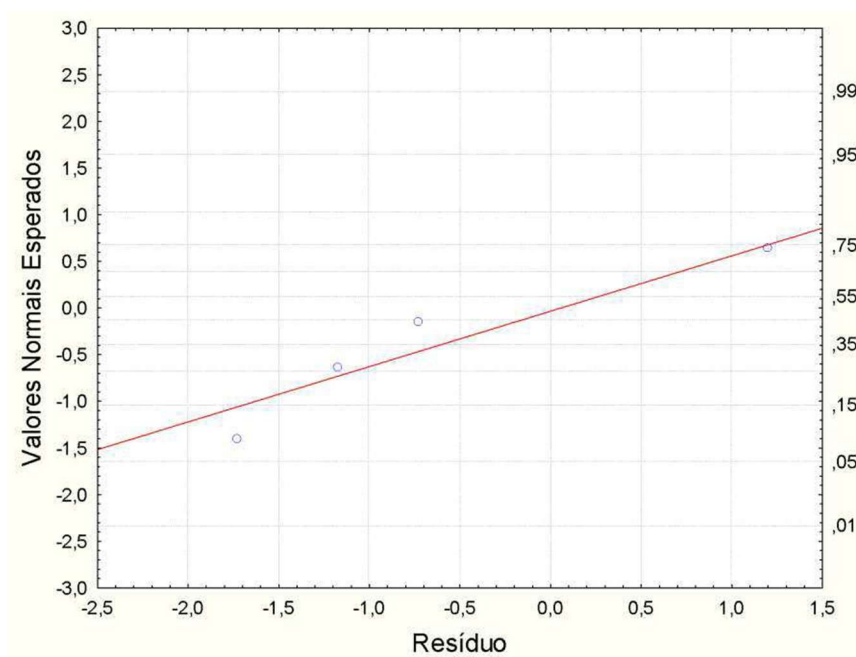
Com base nos resultados apresentados verificou-se que o modelo obtido é estatisticamente significativo, com erro relativo médio inferior a 5% e coeficiente de determinação da regressão R<sup>2</sup> superior a 98,5 para o modelo de primeira ordem obtido, indicando que ele explica 98,9% da variação dos dados observados. Segundo (27) o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) mede a proporção da variação total da resposta que é explicada pelo modelo. Dessa forma, quanto maior o R<sup>2</sup>, isto é, quanto mais próximo de 1, menor será o erro e melhor o modelo.

Além disso, o valor de Fcalculado foi 18,52 vezes maior do que o Ftabelado, mostrando que o modelo obtido além de ser estatisticamente significativo, é também

altamente preditivo dentro da faixa experimental estudada, pois, conforme (28), e (27), para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa, mas também válida para fins preditivos, o valor de  $F_{\text{calculado}}$  deve ser, no mínimo, 4 a 5 vezes o valor de  $F_{\text{tabelado}}$  e o  $R^2$  deve ser maior ou igual a 60%.

Na Figura 2 encontra-se apresentado a probabilidade normal dos resíduos obtidos nos experimentos do processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.

Figura 2 – Gráfico da probabilidade normal dos resíduos obtidos nos experimentos.

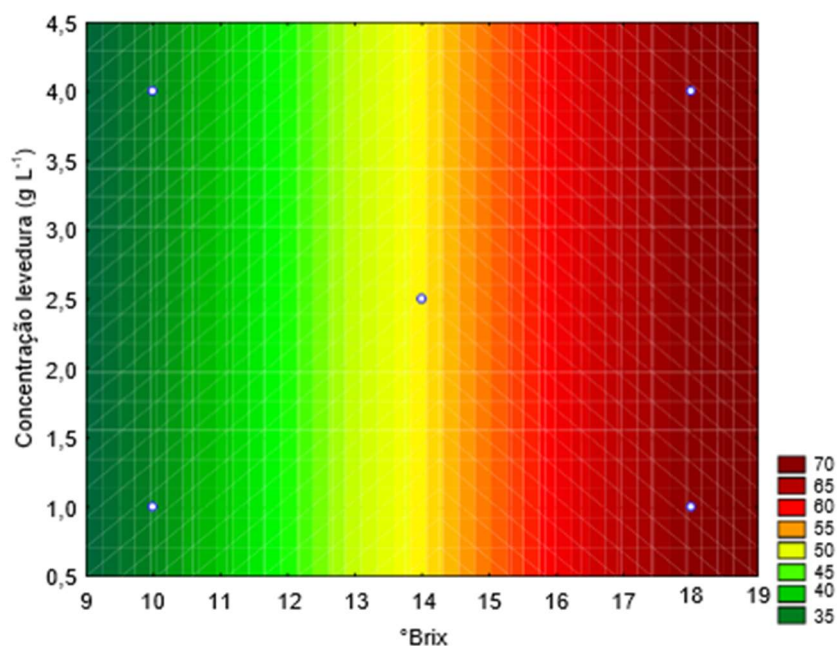


Fonte: dos autores, 2025

Através do gráfico gerado, verificou-se que os resíduos seguem uma distribuição normal, visto que os pontos experimentais estão próximos da linha contínua, o que é representativo de um bom modelo. Segundo (29) quanto mais próximos os pontos experimentais estiverem da linha contínua, mais será válida a suposição da normalidade dos resíduos e se os erros forem distribuídos normalmente, aproximadamente 95% dos resíduos padronizados cairão no intervalo  $(-2,+2)$ . Ao contrário, se os resíduos encontrados estiverem muito longe dessa faixa, tem-se caracterizada assim a presença de “outliers”, pontos que são muito diferentes dos demais dados experimentais.

Com o modelo validado, foi possível gerar uma curva de contorno que serve para definir melhor a região de máximo da variável dependente teor alcoólico, apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Curva de contorno obtida para o teor alcoólico no processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.



Fonte: dos autores, 2025

A partir da curva de contorno, verificou-se que o teor alcoólico aumenta à medida que a concentração do °Brix aumenta também, comprovando a influência positiva desta variável, de modo que índices mínimos de etanol foram atingidos quando se processou em concentrações mais baixas (10 °Brix) e índices máximos sob concentrações extremas (18 °Brix). Como visto, a concentração de levedura em nada influenciou o teor alcoólico alcançado, podendo-se afirmar que com qualquer concentração de levedura utilizada poderá se obter os níveis de etanol obtidos neste experimento. Entretanto, menores quantidades de levedura são indicadas por tornarem o processo mais viável do ponto de vista econômico e favorece o âmbito industrial.

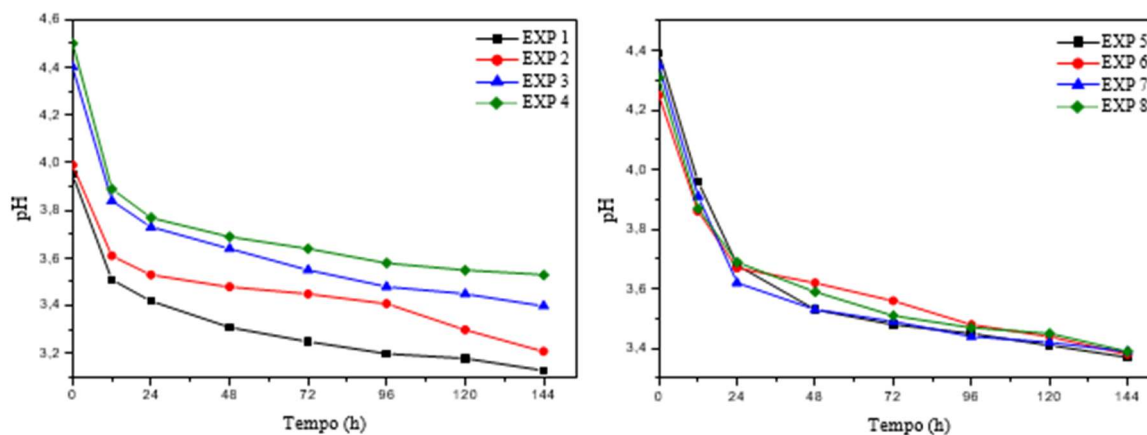
### **Processo cinético fermentativo**

O estudo cinético de todas as variáveis do processo de fermentação alcoólica é necessário para a produção de bebidas alcoólicas de alta qualidade e seguras para o

consumo, pois é através dos valores obtidos neste estudo que se pode confrontar com outros dados experimentais já estudados e assim, delinear parâmetros que possa ser útil a um novo produto que está sendo produzido. A legislação brasileira não dispõe de padrões de identidade e qualidade para as bebidas alcoólicas mistas. Estabelece apenas os limites mínimos e máximos de teor alcoólico que devem variar entre 0,5 a 54%, limitando a comparação de resultados com outras bebidas obtidas por mistura, como é o caso do fermentado de frutas misto e outras pesquisas de mesma natureza.

Na Figura 4 encontram-se apresentados a variação do pH para os 8 experimentos executados ao longo de 144 horas, tempo este selecionado para a análise dos dados no planejamento experimental do processo fermentativo.

Figura 4 – Perfil da variação do pH do mosto no processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.



Fonte: dos autores, 2025

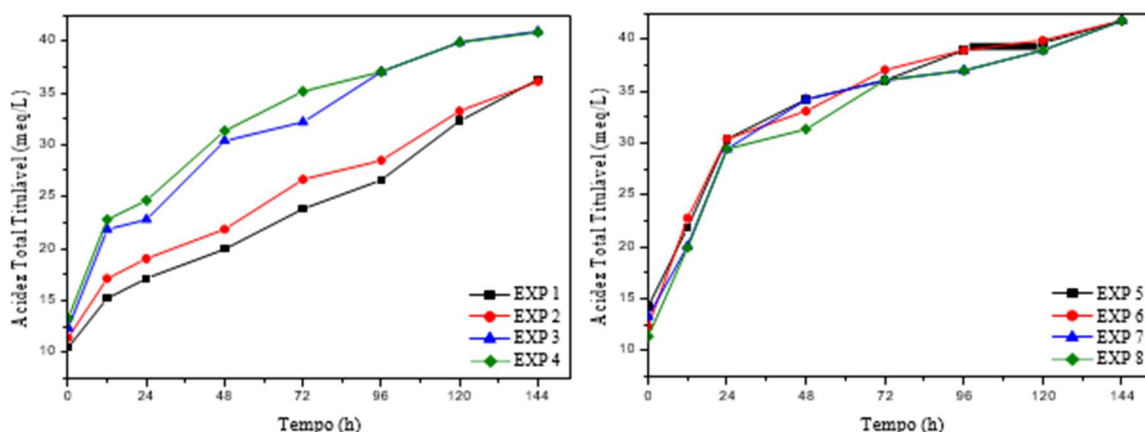
Por meio dos gráficos obtidos, verificou-se que os experimentos 1, 2, 3 e 4 apresentaram entre si um comportamento similar com uma redução brusca do pH nas primeiras 12 h de fermentação, seguida de uma suave redução ao longo do processo, no entanto com valores finais distintos. Por outro lado, para os experimentos 5, 6, 7 e 8, que também apresentaram comportamentos similares, foi observado uma queda brusca no valor de pH até o tempo de 24 h de fermentação, seguida de uma suave redução ao longo do processo.

Essa queda brusca no pH evidencia o início da fase de fermentação principal ou tumultuosa, caracterizada pela intensa liberação de gás carbônico, pela elevação da acidez do mosto e, conseqüentemente, a redução do pH no meio.

No final da fermentação, o maior valor de pH encontrado foi 3,53 para o experimento 4 e o menor foi 3,13 para o experimento 1. Valores semelhantes aos obtidos por (30), que trabalhou com vinho de mel obteve valores de pH das três formulações, respectivamente, F1 (3,98–3,73), F2 (4,12–3,72) e F3 (4,23–3,82), diminuíram do 1º dia para o 21º dia devido ao aumento da fermentação e do tempo de armazenamento, ressaltando um comportamento mais gradual entretanto ressaltando o perfil de queda do pH.

Na Figura 5 encontram-se os resultados referentes à acidez total titulável dos experimentos do processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.

Figura 5 – Curvas de acidez total titulável obtido no processo de fermentação alcoólica.



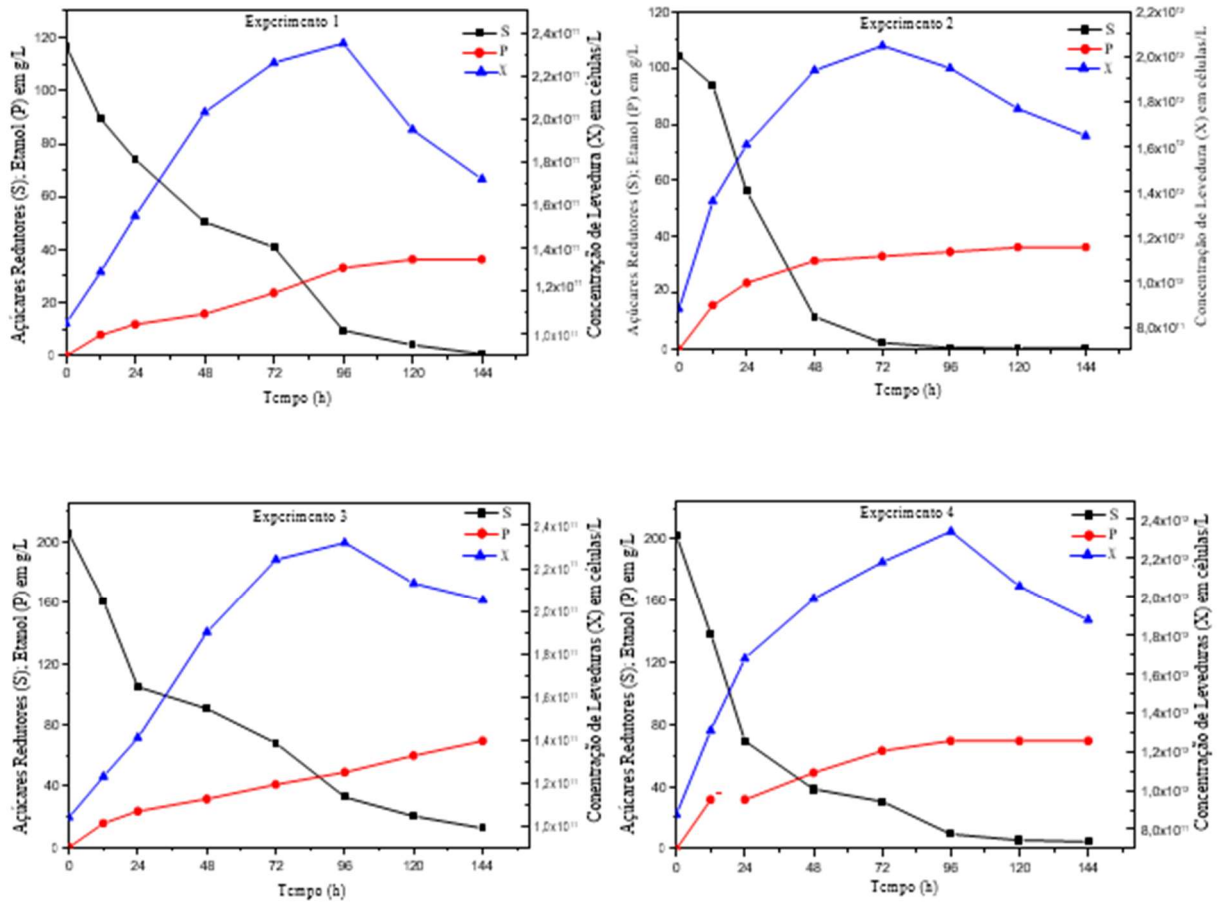
Fonte: dos autores, 2025

Nas curvas da acidez, observou-se que houve um aumento gradativo ao longo de todo o processo de fermentação para os experimentos de 1 a 4. No trabalho de (31) a acidez total das diferentes formulações variou de 61,22 a 94,43 mEq.L<sup>-1</sup>, com a formulação C apresentando o maior valor, seguida por D, B e A (B: 5% de polpa de pitaya; C: 10% de polpa de pitaya; D: 15% de polpa de pitaya), essa maior acidez observada nas formulações B, C e D pode ser atribuída à presença de ácidos orgânicos da polpa de pitaya, que traz essa característica nos processos fermentativos. Segundo (32), o aumento da acidez e a redução do pH no processo de fermentação se deve, provavelmente, à produção de ácidos orgânicos, láctico, acético e succínico. Ademais, pode ter ocorrido adsorção do dióxido de carbono no fermentado.

Os resultados mostraram que a acidez da bebida ficou entre 36,1 e 41,8 meq/L. Esses valores são baixos quando comparados com a legislação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para o fermentado de frutas misto, onde teor de acidez total deve está compreendido na faixa de 50 a 130 meq/L (33). A adição de ácidos orgânicos ao mosto do mel pode ser uma alternativa para o ajuste da acidez total. Os valores dos dados experimentais referentes às variações de concentração de substrato (açúcares redutores), concentração de produto (etanol) e concentração de levedura estão representados pelas Figuras 6 e 7.

Na Figura 6 encontram-se apresentados os resultados referentes à cinética fermentativa referente aos experimentos 1, 2, 3 e 4 do planejamento experimental.

Figura 6 – Cinética fermentativa referente aos experimentos do planejamento experimental.



Fonte: dos autores, 2025

De acordo com a Figura 6, observou-se nos experimentos 2 e 4, que apresentaram concentrações de sólidos solúveis totais de 10 e 18 °Brix, respectivamente, mas com concentrações de leveduras iguais, um comportamento semelhante quanto à cinética de consumo de açúcares redutores. Em ambos os casos, ocorreu uma acentuada redução dos açúcares até 48 horas de fermentação alcoólica. Nesse período, o experimento 2 apresentou um teor de 11,7 g/L e o experimento 4, 38,3 g/L de açúcares redutores, correspondendo a um consumo aproximado de 80% do substrato inicial. Essa rápida redução é atribuída, provavelmente, à elevada concentração de leveduras nesses tratamentos.

Por outro lado, os experimentos 1 e 3, conduzidos com menor concentração de leveduras, apresentaram uma velocidade inferior de consumo do substrato. Após 48 horas, foram registrados teores de açúcares redutores de 50,5 g/L e 90,7 g/L, respectivamente, correspondendo a um consumo em torno de 55%.

Em relação à produção de etanol, todos os experimentos alcançaram valores dentro da faixa estabelecida pela legislação vigente para bebidas alcoólicas mistas (3,95

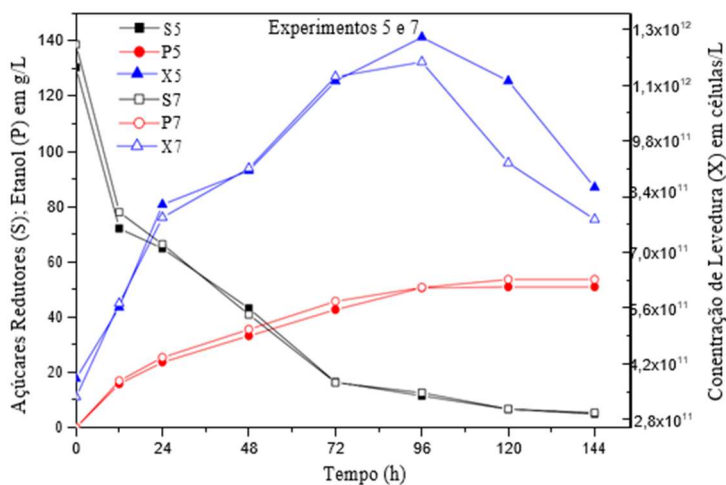
a 426,6 g/L). Os experimentos 1 e 2, que possuíam a mesma concentração inicial de sólidos solúveis totais, apresentaram teor alcoólico final de 36,34 g/L e atingiram a estabilização em 120 horas. No entanto, o experimento 2 já havia alcançado 33,18 g/L em apenas 48 horas de fermentação, demonstrando uma progressão mais acelerada da fermentação alcoólica, provavelmente em decorrência da maior concentração celular.

Nos experimentos 3 e 4, que continham uma maior concentração de sólidos solúveis totais e diferiram entre si apenas quanto à quantidade de leveduras, verificou-se a maior produção de etanol (69,52 g/L), atingida em 144 horas no experimento 3 e em 96 horas no experimento 4.

Quanto à concentração celular, constatou-se um aumento do número de células em todos os experimentos. Após 96 horas de fermentação, foi observado o declínio populacional, após atingirem os valores máximos de  $2,35 \times 10^{11}$ ,  $2,32 \times 10^{11}$  e  $2,34 \times 10^{12}$  células/L para os experimentos 1, 3 e 4, respectivamente. No experimento 2, a concentração de leveduras aumentou gradativamente até atingir o pico máximo de  $2,05 \times 10^{12}$  células/L em 72 horas, seguido de um declínio, atribuído à redução do substrato disponível no meio. Em todos os experimentos, observou-se um crescimento exponencial da população celular até as 12 horas iniciais de fermentação, indicando a inexistência de uma fase de adaptação prolongada pelas leveduras.

O comportamento cinético dos experimentos do ponto central do planejamento experimental feito em quatro repetições pode ser observado através da Figura 7.

Figura 7 – Cinética fermentativa referente ao ponto central (experimentos 05 e 07).



Fonte: dos autores, 2025

Observa-se que os experimentos do ponto central apresentaram boa reprodutibilidade quanto aos parâmetros analisados. Nota-se que, durante todo o processo praticamente, à medida que a concentração de açúcares redutores diminui ocorre um aumento proporcional de etanol, característico do perfil ideal da fermentação alcoólica. Com relação à produção de etanol, pode-se perceber uma progressão lenta durante todo o processo de fermentação, alcançando com 120 horas decorridas (mesmo tempo dos experimentos 1 e 2), um teor alcoólico médio de 50,56 g/L. A maior concentração de leveduras encontradas nestes experimentos foi de  $1,24 \times 10^9$  células/L, no tempo de 96 horas de fermentação, assim como os experimentos 1, 3 e 4.

Na Tabela 5 estão os resultados do percentual de conversão do processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.

Tabela 5 – Resultados do percentual de conversão do processo fermentativo da bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo.

<b>Experimentos</b>	<b>°Brix</b>	<b>Conc. Levedura (g/L)</b>	<b>Conversão (%)</b>
1	10,0	1,0	60,83
2	10,0	4,0	68,11
3	18,0	1,0	66,16
4	18,0	4,0	67,23
5	14,0	2,5	76,53
6	14,0	2,5	76,43
7	14,0	2,5	76,53
8	14,0	2,5	76,32

Fonte: dos autores, 2025

A baixa conversão encontrada neste estudo pode ter sido ocasionada pela levedura utilizada, visto que se utilizou uma estirpe específica da produção de vinho, sendo que a maior parte das leveduras enológicas não está adaptada às condições presentes no mosto de mel, devido aos níveis de açúcar elevados, aos valores de pH baixos e as concentrações reduzidas de azoto. Segundo (21) concentrações acima de 5 mg/L dos princípios ativos presentes no lúpulo também podem causar alteração no

crescimento e metabolismo das *Saccharomyces cerevisiae*, reduzindo a eficiência do processo. No entanto, pequenas quantidades de lúpulo foram utilizadas neste estudo, não sendo esse limite ultrapassado.

Dessa forma, em vista de se obter maiores percentuais de conversão, recomendam-se estudos mais contundentes acerca da levedura utilizada no processo de fermentação alcoólica do mosto de mel de abelha.

## CONCLUSÕES

Os experimentos realizados demonstraram que a produção de etanol foi significativamente influenciada apenas pela concentração de substrato, sem efeito da concentração de leveduras ou da interação entre ambos os fatores. Observou-se que o aumento dos sólidos solúveis totais resultou em maior teor alcoólico no produto final. Detectou-se uma discreta redução nos açúcares redutores nos mostos com maior concentração de leveduras, o que pode impactar no perfil sensorial da bebida.

A caracterização físico-química indicou que os parâmetros do mel utilizado estavam dentro dos padrões legais, evidenciando a integridade e a adequada manipulação da matéria-prima. Ressalta-se, no entanto, que méis fora dos padrões de identidade e qualidade também podem ser empregados na fermentação alcoólica. Para maximizar a conversão alcoólica, recomenda-se aprofundar os estudos sobre o comportamento da levedura no processo fermentativo do mel de abelha.

Conclui-se, por fim, que a produção de uma bebida alcoólica mista de mel de abelha e lúpulo é tecnicamente viável, configurando-se como alternativa promissora para o fortalecimento da agroindústria e incremento da renda de produtores rurais do Alto Sertão Paraibano e do Nordeste.

## REFERÊNCIAS

1. CARDOSO, Viviannie Amélia de Aquino. Apicultura no semiárido norte mineiro: um panorama detalhado através da revisão sistemática da literatura. **Ciências Agrárias**, 31 maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11399175>.
2. BASILIO, Natieli Silva; VIEIRA, Vanessa Amaro. Produção de hidromel: aspectos de qualidade e perspectivas de mercado. **Ciência & Tecnologia**, v. 17, n. 1, e17103, 2025. DOI: <https://doi.org/10.52138/citec.v17i01.403>.

3. LIU, Yang; JIANG, Bokai; WANG, Kai. A review of fermented bee products: sources, nutritional values, and health benefits. **Food Research International**, v. 174, p. 113506, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113506>.
4. MORALES-DE LA PEÑA, Mariana; MIRANDA-MEJÍA, Graciela A.; MARTÍN-BELLOSO, Olga. Recent trends in fermented beverages processing: the use of emerging technologies. **Beverages**, v. 9, n. 2, p. 51, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages9020051>.
5. EIDT, Gustavo *et al.* Desenvolvimento e testes de aceitação pelo consumidor de uma bebida à base de mel fermentada por uma cultura inicial multiespécies. **Food Bioscience**, v. 56, p. 103182, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103182>.
6. CICHA-WOJCIECHOWICZ, Daria; DRABIŃSKA, Natália; MAJCHER, Małgorzata Anna. Influência de variedades de mel, técnicas de fermentação e processo de produção nas propriedades sensoriais e compostos odoríferos ativos em hidroméis. **Molecules**, v. 29, n. 24, p. 5913, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29245913>.
7. MAICELO-QUINTANA, Jorge L. *et al.* Potential application of bee products in food industry: an exploratory review. **Heliyon**, v. 10, n. 1, e24056, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24056>.
8. RODRIGUES, Adriana *et al.* Análise físico-química dos méis das abelhas *Apis mellifera* e *Melipona scutellaris* produzidos em regiões distintas no Estado da Paraíba. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1164–1168, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500028>.
9. VASCONCELOS, N. M.; PINTO, G. A. S.; ARAGAO, F. A. S. Determinação de açúcares redutores pelo ácido 3,5-dinitrosalicílico: histórico do desenvolvimento do método e estabelecimento de um protocolo para o laboratório de bioprocessos. Fortaleza: **Embrapa Agroindústria Tropical**, 2013. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 87).
10. WHITE, C. **Yeasts: the practical guide to beer fermentation**. New York: Brewes Publications, 2010. 226 p.
11. BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Instrução Normativa nº 11, de 20 de outubro de 2000**. Regulamento técnico de identidade e qualidade do mel. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 out. 2000. Seção 1, p. 16-17.
12. SOARES, V. G. **Teor de composto fenólicos e análises físico-químicas em diferentes condimentos in natura e desidratado de alecrim, hortelã, manjeriço e orégano**. Morrinhos, GO: IF Goiano, 2020. 29 f.
13. PARPINELLI, R. S. **Qualidade microbiológica e caracterização físico-química de amostras de mel de abelhas sem ferrão de seis regiões do estado do Paraná**. 2016. 81 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.
14. SANTOS, David Fernando dos *et al.* Honey-kombucha beverage with yerba maté infusion: development, polyphenols profile, and sensory acceptance.

**International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 36, p. 100909, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100909>.

15. CARVALHO, C. A. L. de; SOUZA, B. de A.; SODRÉ, G. da S.; ALVES, R. M. de O.; MARCHINI, L. C. **Mel de abelhas sem ferrão: contribuição para a caracterização físico-química**. Cruz das Almas: Universidade Federal da Bahia/SEAGRI-BA, 2005. 32 p.
16. SANTOS, F. C. F. dos; ANGULO, E. L. H.; SANTOS, M. E. C. dos. Caracterização físico-química de amostras do mel de abelhas nativas. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 5, p. 2366-2382, 2021.
17. SANTOS, A. C. A. **Produção artesanal de hidromel a partir de mel coletado na região sul do Estado do Tocantins como uma fonte alternativa de renda para o apicultor familiar**. 2019. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Federal do Tocantins, Campus de Gurupi, Tocantins, 2019.
18. LUCENA, R. M. **Caracterização do mel de abelha da espécie *Apis mellifera* L. da região do Curumataú Oriental Paraibano**. 2020. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agroindústria) – Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, 2020.
19. CRANE, E. **O livro do mel**. São Paulo: Nobel, 1983. 225 p.
20. VARGAS, T. **Avaliação da qualidade do mel produzido na região dos Campos Gerais do Paraná**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Ponta Grossa do Paraná, Ponta Grossa, 2006.
21. OLIVEIRA, A. J. *et al.* **Métodos para o controle microbiológico na produção de açúcar e álcool**. Piracicaba: FERMENTEC/FEALQ/ESALQ, 1996. 89 p.
22. ANACLETO, D. A.; SOUZA, B. A.; MARCHINI, L. C.; MORETI, A. C. C. C. Composição de amostras de mel de abelha Jataí (*Tetragonisca angustula* Latreille, 1811). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 3, p. 535-541, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009000300012>.
23. KROLOW, A. C. *et al.* Estabilidade físico-química de amostras de méis da região Sul do Rio Grande do Sul no período de armazenamento. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 19796-19806, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-229>.
24. SOUZA, J. M. **Preparação e caracterização físico-química de aguardente de pimenta**. São Cristóvão, 2017. 26 f.
25. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 55, de 31 de outubro de 2008**. Aprova os regulamentos técnicos para a fixação dos padrões de identidade e qualidade para as bebidas alcoólicas por mistura. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 out. 2008. Seção 1, p. 5.

26. FENTIE, Eskindir Getachew *et al.* Dinâmica de fermentação do vinho de mel etíope fermentado espontaneamente, *Tej. LWT*, v. 155, p. 112927, 1 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112927>.
27. BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2. ed. Campinas: Ed. UNICAMP, 1995. 299 p.
28. BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experiments: an introduction to design, data analysis and model building**. New York: Wiley e Sons Inc., 1978. 653 p.
29. CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003. 260 p.
30. GEBREMICHAEL, Weleba Muesho *et al.* Padronização e caracterização do processo de Mies: vinho de mel etíope. *Heliyon*, v. 10, n. 20, e39272, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39272>.
31. GOMES, Luís Felipe de Medeiros *et al.* Pitaya melomel: preparação, cinética de fermentação e caracterização físico-química e de voláteis. *Food Bioscience*, v. 68, p. 106703, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106703>.
32. BORZANI, W.; BARALLE, S. B. Correction of results obtained in laboratory-scale studies of batch fermentation kinetics. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 25, p. 3201-3206, 1983.
33. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 35, de 16 de novembro de 2010**. Padrões de identidade e qualidade para as bebidas alcoólicas por mistura. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 nov. 2010. Seção 1, p. 2.